INŻYNIERIA ROLNICZA

Seria: Monografie i Rozprawy

ISBN 978-83-64377-26-6

Paweł Konopacki

System magazynowania ciepła w akumulatorze ze złożem kamiennym - analiza energetyczna i wpływ na mikroklimat w tunelu foliowym

> Komitet Inżynierii Rolniczej Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

> > Kraków 2019

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

System magazynowania ciepła w akumulatorze ze złożem kamiennym - analiza energetyczna i wpływ na mikroklimat w tunelu foliowym

A heat storage system using a rock-bed accumulator - the energy analysis and the impact on the microclimate in a plastic tunnel

Paweł Konopacki

Kraków 2019

Patronat naukowy: Komitet Inżynierii Rolniczej

Komitet honorowy

Prof. dr hab. Janusz Haman – czł. rzecz. PAN Prof. dr hab. Rudolf Michałek – czł. rzecz. PAN

Rada Naukowa Wydawnictwa

Prof. Radomir Adamovsky (Rep. Czeska) Prof. Andrew Berger (USA) Prof. Stefan Cenkowski (Kanada) Prof. Dariusz Dziki (Polska) Prof. Girma Gebresenbet (Szwecja) Prof. Van der Goot, Atze Jan (Holandia) Prof. Dorota Haman (USA) Prof. Jayson K. Harper (USA) Doc Ing. Zuzana Hlaváčová, CSc. (Słowacja) Prof. Ryszard Hołownicki (Polska) Dr ing. Bruno Huyghebaert (Belgia) Prof. Leon Kukiełka (Polska) Prof. Marek Opielak (Polska) Prof. Jacek Przybył (Polska) Prof. Michele Rinaldi (Włochy) Prof. Spiro E Stefanou (USA) Dr Bernardo Strasbourg (Brazylia) Prof. Bulgakov Vlodymyr (Ukraina)

Komitet Redakcyjny

Prof. dr hab. inż. Maciej Kuboń Dr hab. inż. Sławomir Kocira, prof. UP Prof. dr hab. Pavol Findura Prof. dr hab. Leon Kukiełka redaktor naczelny
sekretarz

Wydawca:

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków, ul. Balicka 116B

Recenzenci:

Prof. dr hab. inż. Sławomir Kurpaska Dr hab. inż. Piotr Sołowiej, prof. Uczelni

- Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
- Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

ISBN 978-83-64377-26-6

Druk i oprawa:

NOVA SANDEC ul. Lwowska 143, 33-300 Nowy Sącz tel. +48 (18) 547 45 45 e-mail: biuro@novasandec.pl; http://www.novasandec.pl Ark. wyd. 7,85 ; ark. druk. 7,00 Nakład: 100 egz.

Spis treści

| W | YKAZ | WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I OZNACZEŃ | | |
|----|-------|---|--|--|
| 1. | WPRO | DWADZENIE | | |
| 2. | PRZE | GLAD PIŚMIENNICTWA | | |
| | 2.1. | Udział produkcji warzyw pod osłonami w produkcji ogrodniczej | | |
| | 2.2. | Energochłonność produkcji ogrodniczej i przesłanki dla jej ograniczania | | |
| | 2.3. | Przykłady zastosowania odnawialnych źródeł energii w uprawach pod | | |
| | | osłonami | | |
| | 2.4. | Systemy magazynowania ciepła stosowane w ogrodnictwie | | |
| | 2.5. | Wykorzystywanie akumulatorów ciepła do modyfikowania mikroklimatu | | |
| | | w szklarniach | | |
| | 2.6. | Mikroklimat podczas uprawiania roślin pod osłonami | | |
| | 2.7. | Podsumowanie przeglądu literatury | | |
| 3. | CEL I | BADAŃ | | |
| 4. | ZAKF | AKRES BADAŃ | | |
| 5. | MATI | ERIAŁ I METODY BADAWCZE | | |
| | 5.1. | Obiekt badań | | |
| | | 5.1.1. Konstrukcja akumulatora ciepła | | |
| | | 5.1.2. Tryby pracy akumulatora | | |
| | | 5.1.3. Algorytmy pracy akumulatora | | |
| | 5.2. | System pomiarowy | | |
| | 5.3. | Metodyka obliczeń | | |
| | | 5.3.1. Wielkości charakteryzujące wilgotność powietrza | | |
| | | 5.3.2. Wielkości charakteryzujące entalpię powietrza | | |
| | | 5.3.3. Bilans ciepła związanego z przemianami fazowymi wody | | |
| | 5.4. | Okresy badawcze | | |
| | 5.5. | Obliczenia statystyczne | | |
| 6. | WYN | WYNIKI BADAŃ | | |
| | 6.1. | Ogólna charakterystyka pracy akumulatora | | |
| | 6.2. | Wpływ warunków środowiskowych i początkowej temperatury złoża na | | |
| | | ilość ciepła gromadzoną i odzyskiwaną z akumulatora dla ustalonego | | |
| | | zzakresu przepływów powietrza | | |
| | | 6.2.1. Analiza pracy akumulatora podczas ładowania | | |
| | | 6.2.2. Czynniki wpływające na ilość ciepła odzyskiwanego z akumulatora | | |
| (| 5.3. | Wpływ strumienia zatłaczanego powietrza oraz objętości złoża na ilość | | |
| | | ciepła gromadzonego w akumulatorze oraz z niego odzyskiwanego | | |

| 6.4. | Wpływ | zastosowania akumulatora na mikroklimat w tunelu foliowym | 74 |
|--------|----------|--|-----|
| | 6.4.1. V | <i>W</i> pływ zastosowania akumulatora w trybie dogrzewania roślin | 74 |
| | 6.4.2. V | Npływ zastosowania akumulatora na wzrost i plonowanie roślin | |
| | v | v tunelu foliowym | 83 |
| | 6.4.3. V | Npływ zastosowania akumulatora w trybie chłodzenia | 84 |
| 7. DYS | KUSJA | | 96 |
| 8. WNI | OSKI | | 101 |
| PODZIĘ | KOWAN | ΙΑ | 102 |
| BIBLIO | GRAFIA. | | 103 |
| STRESZ | CZENIE | | 109 |
| SUMMA | .RY | | 110 |

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I OZNACZEŃ

Zmienne i stałe

| c _p | _ | ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu, (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹) |
|----------------|---|--|
| i | _ | entalpia właściwa, (J·kg ⁻¹) |
| Ι | _ | entalpia powietrza wilgotnego, (J·s ⁻¹) |
| m | _ | masa, (kg) |
| Μ | _ | masa cząsteczkowa, (kg·kmol ⁻¹) |
| р | _ | ciśnienie, (Pa) |
| q | _ | strumień powietrza, $(m^3 \cdot s^{-1})$ |
| Q | _ | ciepło, (J) |
| Q | _ | strumień ciepła, (J·s ⁻¹) |
| r | _ | ciepło parowania wody, (kJ·kg ⁻¹) |
| R | _ | nasłonecznienie, (Wh·m ⁻²) |
| S | _ | pole powierzchni, (m ²) |
| τ | _ | czas, (s) |
| Т | _ | temperatura, (K, °C) |
| v | _ | prędkość, (m·s ⁻¹) |
| V | _ | objętość, (m ³) |
| VPD | _ | deficyt ciśnienia pary wodnej, ang. vapour pressure deficit, (Pa) |
| Х | _ | stopień wilgoci, zawilżenie powietrza (kg·kg ⁻¹) |
| ρ | _ | gęstość, (kg·m ⁻³) |
| φ | _ | wilgotność względna powietrza, (%) |

Indeksy dolne

| AK | _ | akumulator |
|--------|---|---|
| FAZ | _ | przemiana fazowa |
| KL | _ | progowa kończąca ładowanie (różnica temperatur) |
| KR | _ | progowa kończąca rozładowywanie (różnica temperatur) |
| ŁAD | _ | ładowanie |
| NC | _ | nad kurtyną izolacyjno-cieniującą |
| PC | _ | pod kurtyną izolacyjno-cieniującą, pomiędzy uprawianymi roślinami |
| PD | _ | progowa dogrzewania (temperatura) |
| PL | _ | progowa ładowania (różnica temperatur) |
| PR | _ | progowa rozładowywania (różnica temperatur) |
| PS | _ | progowa schładzania (temperatura) |
| ROZŁAD | _ | rozładowywanie |
| Si | _ | dla poszczególnych sekcji złoża akumulatora, gdzie i=1, 2, 3 |
| STR | _ | straty |
| WE | _ | na wejściu do akumulatora |
| WY | _ | na wyjściu z akumulatora |
| d | _ | dodatkowe |
| | | |

| powietrze suche |
|--------------------------------|
| nasycenie |
| opóźnienie |
| para wodna |
| powietrze |
| pomiędzy uprawianymi roślinami |
| woda |
| zasysane |
| zewnętrzne |
| |

1. WPROWADZENIE

Produkcja ogrodnicza pod osłonami ma od dziesięcioleci utrwaloną pozycję w światowym ogrodnictwie. U swych podstaw miała jako cel rozszerzenie dostępności uprawianych roślin poprzez stworzenie sztucznych warunków dojrzewania korygujących niekorzystne uwarunkowania klimatyczne w danym regionie. Wraz z postępem technicznym i rozwojem ogrodnictwa uprawy pod osłonami przechodziły znaczące przeobrażenia, dostosowując środki i metody produkcji do potrzeb odbiorcy, oczywiście z bezwzględnym wymogiem sprostania zasadom gospodarki rynkowej. W ostatnim czasie równie istotnym elementem wpływającym na kierunki zmian w technologiach produkcji ogrodniczej pod osłonami jest zwiększenie bezpieczeństwa oferowanych produktów, między innymi poprzez wdrażanie idei zrównoważonych metod produkcji mających na celu ochronę środowiska. W zależności od rodzaju upraw dominujących w danych rejonach oraz towarzyszących im uwarunkowań klimatyczno-geograficznych, nowoczesne systemy upraw pod osłonami koncentrują się na tworzeniu optymalnych warunków rozwoju dla roślin przy maksymalnym wykorzystaniu odnawialnych źródeł energii. Jednym z popularnych kierunków ograniczenia energochłonności tego rodzaju produkcji jest zastępowanie wysokich i w pełni wyposażonych szklarni nieogrzewanymi tunelami foliowymi. Ze względu na relatywnie niskie nakłady inwestycyjne, rozwiązania takie są chętnie stosowane w niewielkich, zwykle rodzinnych gospodarstwach, które ze względu na ograniczony areał nie miałyby szans na prowadzenie opłacalnej tradycyjnej produkcji roślinnej lub zwierzęcej. Idea magazynowania naturalnych nadwyżek ciepła powstających w cyklu dobowym w nieogrzewanych tunelach foliowych, w celu ich późniejszego wykorzystania do dogrzewania roślin, jest od wielu lat przedmiotem zainteresowania ośrodków naukowych. Jako element bilansu energetycznego podejście takie ma znaczny potencjał utylitarny, zarówno z punktu widzenia obniżenia kosztów produkcji roślin, jak i pozytywnego wpływu na zrównoważoną gospodarkę naturalnymi zasobami środowiska. Dostępne w literaturze opisy proponowanych rozwiązań technicznych magazynowania ciepła, przede wszystkim ze względu na swój wycinkowy charakter, ale również na specyfikę warunków klimatycznych, mają ograniczoną praktyczną wartość z punku widzenia możliwości ich wykorzystania na potrzeby krajowej produkcji ogrodniczej.

W niniejszym opracowaniu przedstawiona zostanie koncepcja magazynowania nadwyżek ciepła, uzyskiwanych w warunkach krajowych w trakcie uprawy warzyw pod osłonami, z wykorzystaniem akumulatora ciepła o złożu kamiennym.

2. PRZEGLĄD PIŚMIENNICTWA

2.1. Udział produkcji warzyw pod osłonami w produkcji ogrodniczej

Polska jest znaczącym producentem warzyw w Europie. Wyprodukowane w 2015 roku warzywa w ilości 5,1 mln ton stanowiły około 10% wszystkich warzyw wyprodukowanych w grupie krajów UE-15 i 8% w porównaniu do grupy UE-28. Według danych GUS (2018) około 25% ilości warzyw pochodzi z upraw pod osłonami. Po znaczącym wzroście upraw pod osłonami w latach 1995-2006 (Kaniszewski, 2007), w latach 2012-2016 powierzchnia upraw pod osłonami ustabilizowała się na poziomie nieznacznie przekraczającym 5400 ha. Według opracowań GUS-u w 2016 r. ogólna liczba gospodarstw zajmujących się uprawą warzyw pod osłonami wynosiła 9220, w tym zdecydowanie przeważały gospodarstwa duże - o powierzchni powyżej 1 hektara, których było 8122 (Wize, 2018). Zaledwie dekadę wcześniej proporcje te były znacząco różne. Kaniszewski (2007) podawał, że pomidory i ogórki pod osłonami uprawiano w ponad 40 tys. gospodarstw, z których ponad połowa prowadziła produkcję w nieogrzewanych tunelach foliowych o powierzchni nie przekraczającej 0,05 ha. Postępująca od dekady bardzo wyraźna tendencja do specjalizacji i koncentracji produkcji wskazuje na wysoki udział nakładów inwestycyjnych i konieczność umiejętnego optymalizowania kosztów dla utrzymania rentowności przedsięwzięcia. Mając na uwadze, że około 70% kosztów produkcji pod osłonami stanowi energia, wszelkie nowinki technologiczne mogące służyć obniżeniu zużycia energii przy zachowaniu ilości i jakości plonu są pilnie śledzone przez prasę fachową.

Spośród gatunków warzyw uprawianych pod osłonami, największą powierzchnię zajmują pomidory i ogórki. W 2016 roku wielkość tych upraw szacowano odpowiednio na 2150 i 1160 ha (Analizy Rynkowe, 2016), co stanowi łącznie ponad 60% całkowitej powierzchni upraw warzyw pod osłonami. Rozwój upraw pod osłonami wywarł szczególnie istotny wpływ na wzrost produkcji pomidorów, gwarantując stabilność warunków oraz lepszą wydajność. Poza możliwością ich produkcji poza sezonem, ważnym elementem stymulującym popularność tego typu uprawy jest wyższa jakość plonu, zarówno pod względem wysokiej atrakcyjności wizualnej jak i braku, lub śladowej zawartości, pozostałości środków ochrony. Ze względu na brak presji szkodników, pod osłonami możliwe jest ograniczenie stosowania pewnych grup środków ochrony roślin (Sobolewski i in., 2006, 2010). Do zwiększenia się udziału produkcji warzyw pod osłonami w stosunku do upraw w gruncie, przyczyniła się również dostępność sztucznego doświetlania roślin światłem LED, umożliwiająca wcześniejsze przygotowanie rozsady, na przykład pomidora (Treder, 2016; Klamkowski i in., 2012), co sprzyja ogólnie wydłużeniu okresu uprawy warzyw pod osłonami w okresie niekorzystnych warunków atmosferycznych.

2.2. Energochłonność produkcji ogrodniczej i przesłanki dla jej ograniczania

Zasadniczym źródłem kosztów w produkcji szklarniowej jest koszt energii niezbędnej do ogrzania obiektu, który szacuje się na poziomie 60-70% kosztów całkowitych (Hołownicki i in, 2012). Naturalnym kierunkiem działań staje się więc dążenie do redukcji nakładów energetycznych w uprawach pod osłonami, a jednym z rozwiązań praktycznych jest stosowanie, tam gdzie tylko jest to możliwe, obiektów bez ogrzewania, czyli tuneli foliowych. Takie działanie ma nie tylko uzasadnienie finansowe związane z minimalizacją kosztów, ale również i ekologiczne, wynikające z troski o stan środowiska przyrodniczego. Od 2008 roku w krajach UE obowiązują uregulowania prawne narzucające konieczność zastępowania paliw kopalnych źródłami energii odnawialnej oraz zwrócenia uwagi na problematykę poszanowania energii, w tym ograniczenie emisji gazów cieplarnianych (Pakiet energetycznoklimatyczny "3x20") (Kurpaska i in., 2012). Zapisy przyjętego kierunku zmian w gospodarowaniu energią sprawiły, że priorytetem dla postępu w większości obszarów aktywności gospodarczej stały się działania na rzecz ograniczenia energochłonności produkcji, co znalazło odzwierciedlenie w oficjalnym stanowisku państwa polskiego w obszarze średnio- i długofalowej polityki gospodarczej, jakim jest przyjęta przez Radę Ministrów 14 lutego 2017 r. Strategia na rzecz odpowiedzialnego rozwoju (SOR). W dokumencie tym zagadnienia energetyczne i działania sprzyjające zmniejszeniu energochłonności, w tym energochłonności sektora rolno-spożywczego, zalicza się do obszarów decydujących o osiągnięciu celów strategii w zakresie realizacji przez Polskę europejskiej polityki w perspektywie 2030 r., czyli wspomnianego już Pakietu energetyczno-klimatycznego.

W przypadku produkcji ogrodniczej wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, takich jak energia słoneczna, wydaje się naturalnym kierunkiem zmniejszania zapotrzebowania na energię paliw kopalnych i szansą na zmniejszenie energochłonności i kosztochłonności upraw pod osłonami. Pomimo intensywnych badań i postępu w zakresie wykorzystania odnawialnych źródeł energii, zapewnienie jej stabilnych źródeł, tak aby możliwe było jej racjonalne i przewidywalne wykorzystanie, wciąż stanowi wyzwanie dla wdrażania rozwiązań komercyjnych.

W przypadku produkcji ogrodniczej pod osłonami, gdzie zapewnienie ciepła roślinom jest kluczowym elementem tej działalności, aktualne działania mające na celu ograniczenie zużycia energii skupiają się zasadniczo wokół dwóch kierunków: (1) opracowywania rozwiązań technicznych mających na celu zmniejszenie zapotrzebowania na ciepło oraz (2) problematyki poszukiwania i wykorzystania odnawialnych źródeł energii. Pierwszy z kierunków jest z dużym zaangażowaniem realizowany przez komercyjne firmy oferujące elementy infrastruktury (Kurpaska i in., 2012), poprzez wprowadzanie do wyposażenia obiektów ogrodniczych elementów energooszczędnych. Można do nich zaliczyć: pokrycia obiektów o zwiększonej izolacyjności, sterowanie parametrami mikroklimatu wewnątrz obiektu, wieloobwodowe systemy grzewcze wraz ze zbiornikami buforowymi, ekrany ciepła, kurtyny boczne, energooszczędne nawadnianie, energooszczędne doświetlania za pomocą diod LED, stosowanie układów kogeneracyjnych (równoczesne wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej). Oprócz istniejących komercyjnych rozwiązań ukierunkowanych na zmniejszenie zuży-

cia energii, przed nauką stoją wyzwania związane ze wskazywaniem alternatywnych kierunków pozyskiwania energii. Stąd wszystkie uczelnie rolnicze w Polsce zaangażowane są w badania nad odnawialnymi źródłami energii (OZE).

2.3. Przykłady zastosowania odnawialnych źródeł energii w uprawach pod osłonami

Według definicji zamieszczonej w Ustawie z dnia 10 kwietnia 1997 r. regulującej Prawo energetyczne, jako odnawialne źródła energii uważa się "źródła wykorzystujące w procesie przetwarzania energię wiatru, promieniowania słonecznego, geotermalną, fal, prądów i pływów morskich, spadku rzek oraz energię pozyskiwaną z biomasy, biogazu wysypiskowego, a także z biogazu powstałego w procesach odprowadzania lub oczyszczania ścieków albo rozkładu składowanych szczątek roślinnych i zwierzęcych". Według oficjalnych prognoz Ministerstwa Środowiska (2001), w Polsce największe możliwości tkwią w pozyskiwaniu energii odnawialnej z biomasy, energii promieniowania słonecznego, energii geotermalnej, energii wiatrowej oraz energii wód. Według metodologii BP (2018) w 2016 roku udział OZE wynosił około 6,2% krajowego zużycia energii pierwotnej. Natomiast według GUS w 2016 roku udział energii ze źródeł odnawialnych w finalnym zużyciu energii ogółem wyniósł 8,3%, a w końcowym zużyciu energii brutto 11,3% (GUS, 2018).

Z punktu widzenia praktycznej możliwości zastosowania odnawialnych źródeł energii na potrzeby energetyczne ogrodnictwa jako najbardziej perspektywiczne rozwiązania wskazuje się pompy ciepła i kolektory słoneczne (Sethi i Sharma, 2008; Hassanien i in., 2016; Cuce i in., 2016). Oczywiście użyteczność poszczególnych źródeł energii zależy od regionu i sze-rokości geograficznej, co od wielu lat było przedmiotem zainteresowania badaczy, którzy analizowali opłacalność stosowania urządzeń energetyki odnawianej stosowanych w różnych sposobach ogrzewania szklarni (Garcia i in., 1998; Santamouris i in., 1994a). Jak wspomniano wcześniej, również Polska dysponuje dużym potencjałem na rzecz wykorzystania energii solarnej (Toruński, 2010), choć jak dotąd wykorzystanie tej formy energii jest bardzo małe.

Pomimo tego, że konwersja fototermiczna, jako bezpośrednia zamiana energii promieniowania słonecznego na ciepło, zapewnia wysoką sprawność energetyczną, to efektywność wykorzystania tego źródła energii jest uzależniona od stosowania w instalacji dodatkowego elementu w postaci akumulatora ciepła (Cabeza i in., 2015). Jest to element szczególnie istotny w przypadku zastosowań w ogrodnictwie, gdzie największe zapotrzebowanie na ciepło występuje zwykle w nocy, co wymusza konieczność przesunięcia w czasie momentu konwersji i przekazania energii do odbiornika (Chel i Kaushik, 2011; Boudila i in., 2014). Dostępna literatura w zakresie możliwych rozwiązań technicznych pozwalających na gromadzenie i odzyskiwanie ciepła na potrzeby ogrzewania obiektów szklarniowych jest obszerna. Badania nad wykorzystaniem różnych rodzajów akumulatorów ciepła w produkcji ogrodniczej pod osłonami są prowadzone na świecie od ponad 40 lat (Nash i Williamson, 1978; Walton i in., 1979; Huang i in. 1981; Jaffrin i Cadier 1982; Bredenbeck, 1984). Większość z tych opracowań dotyczyło skali laboratoryjnej, a rozważane zagadnienia odnosiły się do konkretnych warunków klimatycznych i problemów specyficznych dla upraw ogrodniczych w danym kraju. Oprócz regionów strefy umiarkowanej o relatywnie niskim natężeniu promieniowania słonecznego (Belgia, Polska, Szwecja, Dania, Kanada, Wielka Brytania) tematyka pojawia się w literaturze krajów śródziemnomorskich (Hiszpania, Portugalia, Grecja), Afryki Północnej (Maroko, Tunezja) a także krajów azjatyckich (Indie, Chiny, Korea).

Bardzo ważnym aspektem praktycznego wykorzystania akumulatorów ciepła, określanych również jako systemy magazynowania ciepła w obiektach szklarniowych, jest możliwość ich używania zarówno do ogrzewania jak i chłodzenia roślin (Paksoy i Beyhan, 2014). W związku z tym, akumulatory ciepła klasyfikuje się również jako narzędzie przydatne do regulowania i modyfikowania mikroklimatu w uprawie roślin pod osłonami (Levit i in., 1989; Sams i in., 2011; Sethi i in, 2013; Attar i in., 2014; Mogharreb i in, 2014, Bezari i in, 2015).

Wraz z postępem technologicznym i informatycznym tematyka doniesień wyraźnie przesuwa się w kierunku możliwości przewidywania efektywności stosowania poszczególnych systemów magazynowania energii, w zależności od sposobu jej gromadzenia i odzyskiwania (Sethi, 2009; Sethi i in, 2013; Attar i in., 2014; Al-Mohdouri i in., 2014; Ntinas i in., 2014; Lu i in., 2017; Priarone i in., 2017; Xu i in., 2017).

Oprócz możliwości magazynowania i odzyskiwania ciepła w cyklu dzień – noc, aktualnie trwają prace nad opracowaniem systemów umożliwiających wykorzystanie zmagazynowanych nadwyżek ciepła w cyklach sezonowych (Pinel i in., 2011; Xu i in., 2014, Zhang i in., 2015).

2.4. Systemy magazynowania ciepła stosowane w ogrodnictwie

Najbardziej podstawowy podział stosowany w systematyce akumulatorów ciepła jest związany ze sposobem dystrybucji zmagazynowanego ciepła do miejsca jego odbioru i jest to podział uniwersalny dla wszystkich instalacji, w tym dla instalacji dedykowanych dla upraw ogrodniczych pod osłonami (Kurpaska, 2007; Sethi i Sharma, 2008). Jeśli czynnik ogrzany promieniowaniem słonecznym (np. woda lub powietrze) krąży w instalacji wyłącznie na skutek konwekcji lub grawitacji, to mamy do czynienia z akumulatorem pasywnym. W odróżnieniu od akumulatorów pasywnych, akumulatory aktywne to takie, w których zastosowano wymuszony przepływ czynnika grzewczego, wymagający dostarczenia do układu dodatkowej energii niezbędnej do pracy pomp lub wentylatorów.

Inny podział akumulatorów odnosi się do materiału akumulującego ciepło. Podział ten w najbardziej ogólnej postaci przedstawiany jest jako podział na trzy grupy: akumulatory o złożu stałym, akumulatory cieczowe i akumulatory PCM (*ang.* Phase change material), gdzie czynnikiem roboczym są materiały zmieniające stan skupienia (Sethi i Sharma, 2008; Cabeza i in., 2015).

Do najprostszych systemów umożliwiających wykorzystanie energii promieniowania słonecznego na cele produkcji roślinnej zalicza się pasywne instalacje magazynujące ciepło w akumulatorach cieczowych (Santamouris i in., 1994b). Zbiorniki z wodą o różnej wielkości, w tym worki, beczki lub rury, umieszczone bezpośrednio na powierzchni gleby, przy ścieżkach lub wzdłuż północnej ściany, często okryte czarna folią lub na niej położone, pełnią rolę kolektorów słonecznych absorbując ciepło w ciągu dnia, nawet przy niewielkiej radiacji. W nocy zmagazynowane ciepło jest oddawane do wnętrza obiektu na drodze radiacji i naturalnej konwekcji. Przy odpowiednio dużej objętości medium, uzyskiwano podwyższenie temperatury w obiekcie w stosunku do temperatury na zewnątrz rzędu 2,5-4°C, a w miesią-cach zimowych 0,6-1,5°C (średnie dane dla kilkudziesięciu obiektów w różnych szerokościach

geograficznych). Próby umieszczania dodatkowych polietylenowych zbiorników z wodą na wysokości 1 m, dały bardzo korzystne efekty energetyczne, ale w obiekcie zostało za mało miejsca na rośliny (Santamouris i in., 1994b). Jak widać na tym przykładzie, pomimo niskich nakładów inwestycyjnych dla akumulatorów pasywnych, wynikających z prostoty konstrukcyjnej, brak wymuszonego przepływu czynnika grzewczego ogranicza ilość ciepła możliwego do zakumulowania. W efekcie, akumulatory pasywne w porównaniu do systemów aktywnych charakteryzują się bardzo niską sprawnością zarówno w odniesieniu do danych warunków atmosferycznych, jak i jednostkowej objętości złoża (Santamouris i in., 1994a; Gupta i Tiwari, 2002). Wzbogacenie klasycznego systemu pasywnego o, najprostszy nawet, wymuszony obieg medium cieplnego może znacząco podnieść efektywność takiego systemu. Ntinas i in. (2011) poprzez zastosowanie rękawów foliowych wypełnionych wodą z wymuszonym przepływem powietrza wokół nich uzyskali 36% oszczędność w zużyciu oleju opałowego podczas uprawy pomidora w tunelu foliowym w okresie marzec-maj, co w przeliczeniu na 1 ha wyniosło 11,2 m³ oleju.

Równie popularny i niskonakładowy pasywny system magazynowania energii polega na wykorzystaniu jako akumulatora ciepła elementów konstrukcyjnych budynków, którym zwykle jest północna ściana obiektu szklarniowego, często czarna dla wzmocnienie absorpcji ciepła (Santamouris i in., 1994b). Ściana północna absorbując energię słoneczną docierającą przez przeszklony sufit i ścianę południową wywołuje samoczynny ruch ciepła, który może zarówno obniżać temperaturę w obiekcie, jak i ją podnosić, w zależności od różnicy temperatur. W przypadku obiektów szklarniowych nieogrzewanych jest wykorzystywana jako akumulator ciepła pozwalający na dogrzewanie roślin (Sallanbas, 1987; Kurpaska, 2007). System ten jest rozpowszechniony w Azji i wykorzystywany w tak zwanym Chinese Solar Greenhouse (CSG), (Gao i in., 2010). Szacuje się, że system ten jest wykorzystywany w obiektach o łącznej powierzchni 300-500 tys. ha, przy czym część instalacji pasywnych dla zwiększenia wydajności do budowy bądź okładania ścian północnych wykorzystuje materiały PCM o istotnie wyższej pojemności cieplnej niż tradycyjne materiały budowlane (Machida i in., 1985; Kürklü, 1998; Dutil i in., 2014).

W odróżnieniu od akumulatorów pasywnych, akumulatory aktywne, pomimo wyższych nakładów inwestycyjnych i konieczności stosowania dodatkowych źródeł energii oferują większą możliwość oddziaływania na procesy wymiany ciepła i masy intensyfikując je lub regulując w zależności od potrzeb roślin i przebiegu warunków pogodowych (Sethi i Sharma, 2008; Alkilani i in., 2011; Hassanien i in., 2016). Systemy aktywne magazynowania energii zdominowały aktualnie obszar zainteresowania nauki, wskazując na ich potencjał w rozwoju zrównoważonej produkcji ogrodniczej pod osłonami (Chel i Kaushik, 2011; Ermuratskii i in., 2015; Cuce i in., 2016; Lu i in., 2017).

Według Paksoy i Beyhan (2014) w przypadku systemów przeznaczonych do magazynowania ciepła na potrzeby produkcji roślinnej pod osłonami najbardziej aktualnymi i liczącymi rozwiązaniami są:

- akumulatory wodne,
- akumulatory o złożu kamiennym,
- akumulatory PCM (przemiany fazowej),
- ruchome izolacje (kurtyny i ekrany termiczne).

W przypadku, gdy podstawowym celem magazynowanie nadwyżek energii jest jej efekt chłodzenia jako najbardziej efektywne należy wymienić:

- wentylację (naturalną i wymuszoną),
- systemy zacieniania i odbijania promieniowania,
- chłodzenie przez odparowanie (fan-pad system, zamgławianie i zraszanie dachów).

Przy potrzebie stosowania systemów umożliwiających zarówno grzanie jak i chłodzenie roślin najbardziej sugerowane mogą być:

- wgłębne magazynowanie ciepła BTES (ang. borehole thermal energy store),
- podziemny kolektor wody w złożu skalnym ATES (*ang.* aquifier thermal energy storage).
 Podobnie jak w systemach pasywnych, najważniejsza pozycję w rankingu rozwiązań

technicznych utrzymują akumulatory wodne, i to zarówno w odniesieniu do procesów dogrzewania jak i chłodzenia (Redpath, 2012; Tang i in., 2011). Wynika to z dostępności czynnika oraz relatywnie wysokiej pojemności cieplnej. Wadą akumulatorów wodnych jest fakt, że zarówno do ich ładowania, jak i rozładowywania należy stosować dodatkowe wymienniki (Dagdougui i in., 2011), co obniża energetyczną sprawność całej instalacji.

Pod względem efektywności magazynowania najwyżej plasują się akumulatory wykorzystujące przemianę fazową w złożu (Boulard i in. 1990; Fath 1991; Hamada i Fukai 2005; Kürklü, 1998). Materiały przemiany fazowej mają bardzo wysoką pojemność cieplną, ale zwykle są drogie, a zakres temperatur przemian fazowych rzadko odpowiada temperaturom stosowanym w ogrodnictwie. Choć tematyka akumulatorów PCM, jest żywo dyskutowana w literaturze (Dutil i in., 2017), jej praktyczne zastosowanie ma wciąż ograniczone możliwości.

Kompromis pomiędzy ceną a efektywnością składowania energii słonecznej stanowią akumulatory ciała stałego, w których jako złoże można wykorzystywać glebę, piasek, beton, cegły oraz kamienie: żwir, kruszywo magmowe lub otoczaki (Alkilani i in. 2011). Ich zaletą jest duża powierzchnia wymiany ciepła (Sehti i Sharma, 2008), a także niski koszt, wysoka trwałość i łatwość użytkowania. Literatura poświęcona możliwości konfigurowania parametrów technicznych tego rodzaju akumulatorów jest niezwykle bogata (Chandra i Willits, 1981; Bouhdgar i Boulbing, 1990; Sagara i Nakahara, 1991; Choudhury i in., 1995; Singh i in., 2006; Lau, 2007; Mueller i in., 2010). Systemy wykorzystujące złoża kamienne są też chętnie włączane do badań porównawczych i symulacyjnych (Lu i in., 2017; Sams i in., 2011).

2.5. Wykorzystywanie akumulatorów ciepła do modyfikowania mikroklimatu w szklarniach

Utrzymanie właściwego mikroklimatu w obiektach szklarniowych jest istotnym czynnikiem warunkującym jakość i wydajność plonu. W dużym uproszczeniu można stwierdzić, że mikroklimat w obiektach szklarniowych jest wypadkową warunków zewnętrznych, wielkości i konstrukcji szklarni oraz rodzaju i stanu uprawianych roślin (Sethi in., 2013). Najprostsze zabiegi umożliwiające regulowanie mikroklimatu to ogrzewanie oraz wietrzenie szklarni lub tunelu (Van den Bulck i in., 2012; Coomans i in., 2013; Attar i in., 2014). W przypadku tuneli nieogrzewanych, ich nowoczesne wersje wyposażone są w szereg rozwiązań technicznych takich jak wietrzniki, kurtyny, cieniówki, dwuwarstwowe pokrycie (Konopacki i in.,

2012; Sethi i in., 2013; Bezari i in., 2015; Mogharreb i in., 2014). Oprócz zabiegów związanych wyłącznie z cyrkulacją powietrza i ograniczeniem radiacji wewnątrz obiektu, możliwe jest oddziaływanie ma mikroklimat poprzez zastosowanie elementów zdolnych do magazynowania ciepła. Podstawowe rozwiązania tego typu wykorzystują właściwości cieplne wody. Umieszczenie w obiektach szklarniowych dużych zbiorników wody umożliwia nie tylko sterowanie temperaturą, ale pozwala też na bardziej racjonalną gospodarkę energetyczną (Gupta i Tiwari, 2002). Spośród innych systemów magazynowania ciepła, wykorzystanie akumulatora glebowego umożliwiło wzrost temperatury powietrza w tunelu ogrodniczym o 4°C (Kurpaska i Latała, 2010), jednakże badania prowadzono w tunelu bez uprawy roślin. W związku z brakiem dostępnych wyników badań nad wykorzystaniem nadwyżek ciepła przydatnych dla praktyki ogrodniczej, konsorcjum naukowe złożone z Instytutu Ogrodnictwa i Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie w 2010 roku podjęło próbę opracowania kompleksowej technologii magazynowania ciepła dla produkcji towarowej w nieogrzewanych tunelach foliowych w warunkach krajowych. Zakres projektu poświęconego realizacji tego celu obejmował nie tylko opracowanie wytycznych konstrukcyjno-eksploatacyjnych i całościową analizę procesu magazynowania ciepła, lecz również określenie jego wpływu na uprawiane rośliny w obiekcie produkcyjnym. Uwzględniając wyniki własnych badań literaturowych nad systemami magazynowania energii (Konopacki i in., 2012), zidentyfikowano dla warunków Polski potrzebę budowania akumulatorów o większej pojemności cieplnej, niż obiekty opisywane w literaturze zagranicznej. Ostatecznie zbudowany w ramach projektu HortiEnergia (POIG.01.03.01-10-115/09), akumulator ciepła o złożu kamiennym, ma najwyższą jednostkową pojemność cieplną spośród znanych dotąd w świecie instalacji, co umożliwiło przeprowadzenie doświadczeń w unikalnej dotąd skali, w warunkach zbliżonych do produkcji towarowej Koncepcja akumulatora oraz wybrane aspekty jego eksploatacji zostały opublikowane w latach 2012-2016 (Hołownicki i in., 2012a; Konopacki i in., 2012, Konopacki i in., 2013, Kurpaska i in., 2012, Kurpaska i in., 2013; Kurpaska i in., 2014), zaś sama konstrukcja instalacji została opatentowana (Hołownicki i in, 2012 b).

2.6. Mikroklimat podczas uprawiania roślin pod osłonami

Uprawa roślin ogrodniczych pod osłonami wymaga utrzymywania mikroklimatu korzystnego dla uprawianych roślin. Pierwotnym celem budowy szklarni i tuneli foliowych było utrzymywanie wyższej temperatury powietrza w nocy i chłodne dni. Wyposażenie szklarni i tuneli w systemy wietrzenia miało na celu, z kolei, zapobieganie dużym wzrostom temperatury w słoneczne dni. Kolejne zmiany w konstrukcji i wyposażeniu szklarni i tuneli foliowych również miały, i nadal mają, na celu dostosowanie warunków uprawy do wymagań uprawianych roślin.

Minimalne temperatury w nocy zalecane dla uprawy roślin pod osłonami zależą od uprawianego gatunku lecz, dla najpopularniejszych w Polsce upraw, są bardzo zbliżone. Dla pomidora, który jest najczęściej uprawiany pod osłonami, właściwy zakres temperatur powietrza w nocy wynosi 16-18°C, a w czasie kwitnienia 16-20°C (Dobrzańska, 1987; Rumpel i Grudzień, 1987). W przypadku uprawy ogórka, drugiego pod względem zajmowanej powierzchni pod osłonami, temperatura powietrza w nocy powinna wynosić 18-20°C, chociaż jesienią, wobec małej intensywności światła, temperaturę można obniżyć do poziomu 16-18°C (Dobrzańska, 1987). Papryka, która zajmuje trzecie miejsce w uprawach pod osłonami w Polsce, wymaga temperatury 16-18°C w nocy podczas wzrostu, 16-19°C podczas kwitnienia i owocowania (Dobrzańska, 1987).

Temperatura powietrza w ciągu dnia dla tych trzech, najczęściej uprawianych pod osłonami w Polsce gatunków warzyw, nie powinna z kolei być zbyt wysoka. Dla prawidłowego wzrostu roślin pomidora temperatura powietrza w dzień powinna wynosić 22-26°C (Rumpel i Grudzień, 1987), a podczas kwitnienia w dni słoneczne 28-30°C, a w dni pochmurne 22-24°C (Dobrzańska, 1987). W przypadku ogórka zakres temperatur optymalnych dla wzrostu wynosi w ciągu dnia według Rumpla i Grudnia (1987) 22-30°C, a według Dobrzańskiej (1987) 26-30°C. Z kolei papryka wymaga dla prawidłowego rozwoju utrzymywania temperatury powietrza w ciągu dnia w zakresie 22-26°C, a dla prawidłowego kwitnienia i owocowania 21-26°C (Dobrzańska, 1987).

Ważnym parametrem mikroklimatu dla uprawianych roślin jest wilgotność powietrza. Według Körnera i Challa (2003) miarą wilgotności, która obiektywnie opisuje warunki wilgotności powietrza pod osłonami jest deficyt ciśnienia pary wodnej (VPD). Miara ta określa różnicę pomiędzy maksymalnym a aktualnym ciśnieniem cząstkowym pary wodnej (Pa) w powietrzu. Dla uprawy roślin niekorzystne są zarówno warunki o bardzo niskim VPD, czyli wysokiej wilgotności powietrza, jak i warunki charakteryzujące się bardzo wysokim VPD, czyli bardzo niska wilgotność powietrza. Przy niskich wartościach VPD (poniżej 400 Pa) stwierdzono przetrwanie patogenów grzybowych i ich rozwój na już zainfekowanych roślinach, a bardzo niskie wartości VPD (poniżej 200 Pa) charakteryzują środowisko sprzyjające infekcjom chorób grzybowych na zdrowych roślinach (Dickens i Potter, 1983; Prenger i Ling, 2009). Z kolei bardzo suche powietrze, o wartościach VPD powyżej 1400 Pa, powoduje zamykanie szparek liściowych, co jest mechanizmem obronnym roślin przed utratą zbyt dużej ilości wody, i spowolnienie fotosyntezy, a co za tym idzie wolniejszy wzrost roślin i niższy plon (Sinclair i in., 2007). Poziom wilgotności powietrza ma także wpływ na efektywność zapylania roślin. Przy wilgotności względnej powietrza ponad 90% (czyli przy temperaturze 25°C dla VPD < 320 Pa) poszczególne ziarna pyłku pomidora sklejają się i nie mogą swobodnie opuścić pylników (Picken, 1984). Natomiast przy niskiej wilgotności powietrza poniżej 55% (czyli przy temperaturze 25°C dla VPD > 1420 Pa) pyłek nie może przykleić się do znamienia słupka, co także utrudnia zapylenie.

2.7. Podsumowanie przeglądu literatury

Aktualna literatura wskazuje, że problematyka wykorzystania nadwyżki ciepła z obiektu ogrodniczego w aspekcie zarówno minimalizacji kosztów ogrzewania, jak i możliwości kształtowania mikroklimatu korzystnego dla wzrostu roślin, jest wciąż otwartym problemem badawczym. Ogólnoświatowy trend poszukiwania alternatywnych źródeł energii sprzyjających ograniczeniu paliw kopalnych i zmniejszenia emisji CO₂ powoduje, że opisywane wcześniej rozwiązania techniczne są implementowane w nowych warunkach środowiskowych. Niestety w większości są to wycinkowe badania stanowiskowe o ograniczonej przydatności dla produkcji towarowej. Wciąż brak jest danych eksperymentalnych dla dużych obiektów, gdyż tego typu badania są niezwykle kosztochłonne. Ze względu na dużą zmienność warunków klimatycznych i zróżnicowanie warunków optymalnych dla wzrostu roślin, zmieniających się dodatkowo w sezonie i wraz z przebiegiem cyklu wegetacyjnego, próby modelowania procesów nie dają wystarczających wskazówek niezbędnych dla wdrażania praktycznych rozwiązań. Spośród wielu koncepcji magazynowania nadwyżek ciepła konwertowanych z promieniowania słonecznego, przed rozpoczęciem badań będących przedmiotem rozważań w niniejszej monografii, w polskich warunkach klimatycznych badano do tej pory jedynie aktywne systemy wykorzystujących pojemność cieplną glebowych akumulatorów wodnych. Uzyskane wyniki wskazywały na potencjał tego typu rozwiązania i celowość ich stosowania w produkcji szklarniowej.

3. CEL BADAŃ

Celem niniejszej rozprawy jest określenie przydatności badanej instalacji do magazynowania nadwyżek ciepła wykorzystującej akumulator o złożu kamiennym, do uprawy roślin pod osłonami w warunkach krajowych. Przyjęto hipotezę roboczą, że zagadnienia energetyczne w analizowanym akumulatorze ciepła można opisać za pomocą makroskopowego modelu wymiany ciepła i masy.

Ujęcie makroskopowe objęto następującymi założeniami:

- rozkład przestrzenny temperatury i wilgotności w złożu akumulatora jest homogeniczny,
- proces ładowania i rozładowywania akumulatora przebiegają w stabilnych warunkach ciśnienia atmosferycznego,
- ciśnienie atmosferyczne odpowiada warunkom normalnym, a wpływ zmian ciśnienia wywoływanych pracą wentylatora został pominięty,
- właściwości termodynamiczne złoża akumulatora pozostają niezmienne,
- złoże akumulatora i kolektory doprowadzające i odprowadzające strumień powietrza są szczelne i nie występują związane z tym straty.

4. ZAKRES BADAŃ

W celu weryfikacji przyjętej hipotezy roboczej zakres pracy objął analizę następujących problemów:

- a) wpływ czynników niezależnych na ilość ciepła magazynowanego i oddawanego z akumulatora o złożu kamiennym,
- b) wpływ zmiennych zależnych od obserwatora na ilość ciepła magazynowanego i oddawanego z akumulatora,
- c) określenie zależności ilościowych pomiędzy zmiennymi niezależnymi i zależnymi a ciepłem magazynowanym i oddawanym z akumulatora,
- d) wpływ wykorzystania akumulatora na mikroklimat w tunelu ogrodniczym.

Czynnikami niezależnymi uwzględnionymi w analizie są parametry fizyczne klimatu zarówno na zewnątrz tunelu ogrodniczego, jak i w jego wnętrzu:

- natężenie promieniowania słonecznego (R),
- temperatura powietrza na zewnątrz (T_{zew}),
- temperatura powietrza wewnątrz tunelu wśród roślin (T_{rośl}),
- temperatura powietrza zasysanego do akumulatora (T_{zas}).

Temperatura złoża akumulatora ($T_{zloża}$) również została uwzględniona w analizie jako czynnik niezależny opisujący stan naładowania akumulatora ciepła. Dodatkowym czynnikiem wykorzystanym do analizy mikroklimatu w tunelu ogrodniczym jest deficyt ciśnienia pary wodnej w powietrzu pomiędzy roślinami (VPD_{rośl}).

Natomiast zmiennymi zależnymi od obserwatora, uwzględnionymi w analizie, są:

- objętość złoża (V_{złoża}),
- strumień powietrza zatłaczany do złoża (q_{pow}).

Graficzna interpretacja zależności pomiędzy elementami analizowanego systemu została przedstawiona na Rys. 1.

Analiza powyższych problemów badawczych pozwoli odpowiedzieć na pytanie, czy w warunkach klimatycznych Polski, akumulator o złożu kamiennym będzie umożliwiał cykliczne ładowanie i rozładowywanie złoża w sposób, który może korzystnie oddziaływać na warunki wzrostu roślin uprawianych w tunelu ogrodniczym bez innych systemów ogrzewania.



Rys. 1. Parametry wejścia oraz wzajemne interakcje pomiędzy elementami systemu magazynowania ciepła

5. MATERIAŁ I METODY BADAWCZE

Badania nad oceną energetyczną akumulatora ciepła o złożu kamiennym prowadzono w latach 2013 i 2014, przy użyciu obiektu zbudowanego w ramach realizacji projektu pt. "Opracowanie innowacyjnych technologii magazynowania energii w produkcyjnych tunelach foliowych" (akronim HortiEnergia, umowa nr UDA-POIG.01.03.01-10-115/09). Zakres prowadzonych doświadczeń obejmował analizę wpływu czynników związanych z dostarczaniem ciepła do akumulatora na przebieg procesu jego magazynowania w złożu, a następnie możliwość jej odzyskania w zróżnicowanych warunkach środowiskowych podczas uprawy roślin w tunelach foliowych współpracujących z akumulatorami ciepła. Analiza obejmowała również wpływ pracy akumulatorów ciepła na mikroklimat wewnątrz tunelu uprawowego.

5.1. Obiekt badań

Obiektem badań były akumulatory ciepła o złożu kamiennym, wypełnione tłuczniem porfirowym frakcji 31÷63 mm, współpracujące ze standardowymi tunelami ogrodniczymi o szerokości 9 m i długości 30 m, pokrytymi podwójną warstwą folii polietylenowej. Tunel był przedzielony w połowie długości ścianą foliową, tworzącą dwie oddzielne komory. Poszczególne akumulatory były zbudowane pod oddzielnymi komorami (Rys. 2). Zadaniem akumulatorów było gromadzenia nadwyżek ciepła, które w komercyjnej uprawie pod osłonami jest tracone. Promieniowanie słoneczne przenikające przez pokrycie tunelu ulega konwersji na ciepło i powoduje wzrost temperatury wewnątrz obiektu, która jednak przez większą część sezonu uprawowego jest zbyt wysoka dla uprawy roślin. Wtedy otwierane są wywietrzniki i ciepło pochodzące z konwersji promieniowania słonecznego jako nadmiarowe jest usuwane na zewnątrz obiektu szklarniowego. Zadaniem akumulatora ciepła jest gromadzenie tego nadmiarowego ciepła, w celu jego wykorzystywania w nocy lub w chłodne dni, gdy temperatura wewnątrz obiektu uprawowego obniży się poniżej zakresu wymaganego przy uprawie roślin.



Rys. 2. Rysunek poglądowy obiektu doświadczalnego

5.1.1. Konstrukcja akumulatora ciepła

Ze względu na masę złoża akumulator został zagłębiony w podłożu i usytuowany pod tunelem (Rys. 3). Dzięki zagłębieniu akumulatora w podłożu uniknięto budowy konstrukcji wsporników ścian bocznych, które byłyby niezbędne przy budowie takiego akumulatora na powierzchni gleby. Schemat konstrukcji akumulatora wraz z pozostałymi elementami instalacji doświadczalnej przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 3. Zasadnicze elementy instalacji doświadczalnej akumulatora ciepła współpracującego z tunelem foliowym: 1 – akumulator o złożu kamiennym podzielony na sekcje, 2 – wentylator tłoczący powietrze do złoża, 3 – króciec zasysający powietrze znad kurtyny termoizolacyjno-cieniującej, 4 – króciec zasysający powietrze spod kurtyny termoizolacyjno-cieniującej, 5 – system rozprowadzania powietrza pod uprawiane rośliny, 6 – rura wyprowadzająca na zewnątrz tunelu powietrze o parametrach nieodpowiadających warunkom uprawy, 7 – króciec zasysający powietrze z zewnątrz tunelu

Poszczególne sekcje akumulatora posadowiono na podłożu wyrównanym piaskiem, na którym rozłożono płyty ekstrudowanego spienionego polistyrenu o zamkniętych komórkach, który jest bardzo mało nasiąkliwy i przez to nie traci swoich właściwości izolacyjnych przy kontakcie z wilgotną glebą, nazywanego popularnie styrodurem. Szczegóły konstrukcji poszczególnych sekcji złoża zilustrowano na Rys 4. Płyty polistyrenu twardego o grubości 10 cm i wytrzymałości na ściskanie minimum 600 kPa tworzą dolną izolację termiczną, na której posadowiono płyty stanowiące izolację termiczną ścian bocznych sekcji, wykonaną z płyt o grubości 8 cm i wytrzymałości na ściskanie 200 kPa (polistyren zwykły). Wnętrze tak utworzonej przestrzeni wyłożono folią budowlaną o grubości 0,15 mm, która wyścielała dno i ściany boczne. Na dnie złoża ułożono rury grubościenne PCW Ø110 mm, w których wykonano perforację w postaci dwóch rzędów otworów o średnicy 10 mm rozmieszczone co 12 cm. Po wypełnieniu przygotowanej przestrzeni tłuczniem porfirowym o frakcji 31÷63 mm, na wierzchu ułożono grubościenne rury Ø75 mm, w których wykonano dwa rzędy otworów o średnicy 10 mm rozmieszczone obustronnie co 7÷8 cm. Na powierzchni kruszywa rozłożono włókninę ogrodniczą, a na niej rozsypano warstwę piasku stanowiącą ochronę przed uszkodzeniami dla przewodów nawodnieniowych przewidzianych do aplikacji do złoża środka odkażającego. Całość złoża wraz z górną warstwą piasku zakryto folią budowlaną, której zadaniem było uszczelnienie złoża. Do wykonania warstwy wierzchniej akumulatora ponownie wykorzystano płyty polistyrenu ekstrudowanego twardego o grubości 10 cm.



Rys. 4. Schemat pojedynczej sekcji złoża akumulatora: 1 – ściany boczne (polistyren ekstrudowany zwykły, 8 cm grubości), 2 – izolacja dolna (polistyren ekstrudowany twardy, 10 cm grubości), 3 – izolacja górna (polistyren ekstrudowany twardy, 10 cm grubości), 4 – złoże kamienne (tłuczeń frakcji 31÷63 mm), 5 – przewody nawodnieniowe do aplikacji środka odkażającego złoże, 6 – rury perforowane Ø110 mm do rozprowadzania powietrza w złożu, 7 – rury perforowane Ø75 mm do odbierania powietrza ze złoża (podwójna ilość w stosunku do rur perforowanych Ø110 mm)

Akumulator wykorzystany w badaniach składał się łącznie z trzech sekcji: jednej o szerokości 3,5 m, oraz dwóch sekcji po 1,7 m szerokości i wszystkie o długości 11 m. Wymiary poszczególnych sekcji wyrażane są jako wartości zmierzone wewnątrz płyt polistyrenowych. Wysokość złoża kamiennego wynosiła 0,7 m. Na dnie szerokiej sekcji ułożono cztery rury perforowane Ø110 mm, a na jej wierzchu osiem rur perforowanych Ø75 mm. W wąskich sekcjach układano dwa razy mniej rur. Po uwzględnieniu objętości rur Ø110 mm i Ø75 mm, objętość tłucznia wypełniającego złoże akumulatora wynosiła dla szerokiej sekcji 26,1 m³, a dla wąskich sekcji po 12,7 m³. Podczas ładowania i rozładowywania akumulatora powietrze było zasysane stalowymi rurami spiralnymi Ø315 mm i tłoczone do akumulatora poprzez kolektor zasilający zbudowany w kanale rewizyjnym usytuowanym poza złożem kamiennym. Użyto w nim rur i kształtek kanalizacyjnych PCW Ø250 mm. Na drugim końcu akumulatora usytuowano drugi kanał rewizyjny i kolektor odbierający powietrze zbudowany z rur i kształtek PCW Ø200 mm. Przepływem powietrza sterowano poprzez system przepustnic pokazany na Rys. 5.



Rys. 5. Schemat układu przepustnic do sterowania przepływem powietrza przez akumulator. Literą "W" oznaczono wentylator tłoczący powietrze. Liczby 1–13 identyfikują miejsca zainstalowania przepustnic

Układ przepustnic został zaprojektowany tak, aby w akumulatorze można było badać różne warianty przepływu powietrza (tryby pracy) opisane w następnym rozdziale. Kolejne przepustnice montowane w układzie, zgodnie z numeracją przedstawioną na Rys. 5, pełniły następujące funkcje:

- przepustnica trójnikowa zasysanie powietrza znad lub spod kurtyny izolacyjno-cieniującej,
- (2) zespół dwóch przepustnic pobieranie zimnego powietrza spoza tunelu w celu schładzania złoża akumulatora,
- (3) oddzielenie części kolektora zasilającego sekcje 2 i 3 podczas ładowania szeregowego (wspólna praca sekcji 1+2+3 lub 1+2) lub podczas pracy samej sekcji nr 1,
- (4) skierowanie powietrza rurą boczną wokół sekcji nr 3 przy ładowaniu szeregowym tylko dwóch sekcji (1+2),
- (5, 7, 9) odcinanie poszczególnych sekcji na kolektorze zasilającym,
- (6, 8, 10) odcinanie poszczególnych sekcji na kolektorze odbierającym,
- (11) oddzielenie części kolektora odbierającego powietrze z sekcji 1 i 2 od części odbierającej powietrze z sekcji 3 podczas ładowania szeregowego (wspólna praca sekcji 1+2+3 lub 1+2),
- (12) kierowanie powietrza pod rośliny,
- (13) kierowanie powietrza poza tunel.

5.1.2. Tryby pracy akumulatora

Ładowanie akumulatora rozpoczynało się gdy temperatura powietrza w górnej części tunelu podnosiła się powyżej temperatury złoża, oraz, co równie ważne, gdy temperatura powietrza pomiędzy roślinami przekraczała minimalny poziom temperatury przyjmowany za właściwy dla wzrostu uprawianych roślin. W przypadku uprawianych warzyw jako próg tego zakresu przyjmowano temperaturę 18°C. Powietrze ładujące akumulator ochładzało się podczas przejścia przez jego złoże, więc w pierwszym etapie ładowania akumulatora powietrze z niego wychodzące było kierowane poza tunel (Rys. 6). W ten sposób zapobiegano obniżeniu się temperatury powietrza pomiędzy roślinami poniżej minimalnego progu. W miarę wzrostu natężenia radiacji słonecznej i temperatury powietrza tłoczonego do akumulatora wzrastała temperatura złoża oraz temperatura powietrza wypływającego z akumulatora. Gdy temperatura powietrza wypływającego z akumulatora przekraczała poziom progu minimalnego, tj. 18°C, kierowano strumień powietrza do środka tunelu, za pośrednictwem perforowanych rekawów foliowych umieszczonych pod rynnami uprawowymi (Rys. 7). Równocześnie wzrastające natężenie radiacji słonecznej powodowało znaczny wzrost temperatury powietrza pomiędzy roślinami, a chłodne powietrze z akumulatora pozwalało spowolnić dalszy wzrost temperatury wewnatrz obiektu. Pomimo kierowania chłodnego powietrza wypływającego z akumulatora do środka obiektu szklarniowego, po pewnym czasie temperatura pomiędzy roślinami wzrastała powyżej górnej granicy zakresu temperatur przyjmowanego za optymalny dla wzrostu uprawianych roślin, czyli powyżej 20°C, i komputer sterujący pracą tunelu zaczynał stopniowo otwierać wywietrzniki (Rys. 7).



Rys. 6. Schemat przepływu powietrza podczas pierwszego etapu cyklu ładowania akumulatora. Powietrze wypływające z akumulatora ma temperaturę poniżej 18°C i jest kierowane poza tunel



Rys. 7. Schemat przepływu powietrza podczas drugiego etapu cyklu ładowania akumulatora. Chłodne powietrze wypływające z akumulatora jest kierowane pod rośliny. Z powodu wzrostu temperatury w środku tunelu są otwarte wywietrzniki

W nocy lub w pochmurne i chłodne dni temperatura powietrza pomiędzy roślinami obniżała się poniżej zakresu temperatur optymalnych dla wzrostu roślin, tj. poniżej 18°C. Komputer sterujący pracą tunelu rozciągał nad roślinami i wzdłuż ścian bocznych kurtyny izolacyjno-cieniujące, jednak zabieg ten pozwalał jedynie na spowolnienie dalszego obniżania się temperatury. Występowała potrzeba dogrzewania roślin. Gdy temperatura powietrza pomiędzy roślinami obniżała się poniżej temperatury złoża akumulatora następowało załączenie wentylatora. Powietrze było zasysane króćcem znajdującym się poniżej poziomu kurtyn izolacyjnych, a po jego ogrzaniu podczas przepływu przez złoże akumulatora było kierowane do perforowanych rękawów foliowych rozciągniętych pod roślinami. (Rys. 8).



Rys. 8. Schemat przepływu powietrza podczas cyklu rozładowywania akumulatora i dogrzewania roślin

Opisane powyżej cykle ładowania i rozładowywania akumulatora ciepła mają zastosowanie wiosną, na początku lata i od początku jesieni. W tym czasie uprawy ogrodnicze prowadzone pod osłonami wymagają regularnego dogrzewania. Natomiast w środku lata temperatura powietrza w nocy, czy też w dni pochmurne, jest często tak wysoka, że potrzeba dogrzewania roślin występuje sporadycznie. Zamiast tego występuje potrzeba schładzania roślin w ciągu dnia, bowiem pomimo maksymalnego otwarcia wywietrzników temperatura powietrza wśród roślin osiąga bardzo wysoki poziom. W takiej sytuacji akumulator ciepła był wykorzystywany do schładzania roślin. W tym celu najpierw schładzano złoże akumulatora w ciągu nocy poprzez zasysanie chłodnego powietrza z zewnątrz tunelu i tłoczenie go do akumulatora (Rys. 9). Ogrzane w trakcie przejścia przez złoże powietrze było wypuszczane na zewnątrz. W przypadku, gdy podczas schładzania akumulatora wystąpiła potrzeba dogrzania roślin, tj. gdy temperatura powietrza pomiędzy roślinami obniżyła się poniżej 18°C, system sterujący porównywał temperaturę powietrza wychodzącego z akumulatora z temperaturą powietrza wewnątrz tunelu. Jeżeli powietrze wychodzące z akumulatora było cieplejsze niż powietrze wśród roślin, strumień powietrza był kierowany pod rośliny w celu ich dogrzania (Rys. 10).



Rys. 9. Schemat przepływu powietrza podczas cyklu schładzania złoża akumulatora w nocy. Podgrzane powietrze jest wypuszczane na zewnątrz tunelu



Rys. 10. Schemat przepływu powietrza podczas cyklu schładzania złoża akumulatora w nocy. Podgrzane powietrze jest skierowane pod uprawiane rośliny

W ciągu dnia schłodzone złoże akumulatora było wykorzystywane do obniżania temperatury powietrza w pobliżu uprawianych roślin. Gdy tylko temperatura powietrza wewnątrz tunelu wzrastała powyżej temperatury złoża akumulatora, wentylator był załączany i zasysał powietrze spoza tunelu, które było chłodniejsze niż powietrze w środku. Następnie powietrze było zatłaczane do akumulatora, gdzie ulegało dalszemu schłodzeniu, i kierowane do perforowanych rękawów foliowych pod roślinami (Rys. 11).



Rys. 11. Schemat przepływu powietrza podczas cyklu schładzania roślin w ciągu dnia

5.1.3. Algorytmy pracy akumulatora

W celu realizacji wybranego sposobu działania akumulatora w sposób ciągły mierzono temperaturę powietrza w następujących punktach: wewnątrz tunelu nad kurtyną izolacyjnocieniującą (T_{NC}), wewnątrz tunelu pomiędzy uprawianymi roślinami (T_{PC}), na wejściu do akumulatora (T_{WE}), wewnątrz każdej z trzech sekcji złoża akumulatora (T_{Si} , gdzie i=1, 2, 3), na wyjściu z akumulatora (T_{WY}). W celu uniknięcia zmian trybu pracy instalacji spowodowanych chwilowymi wahaniami mierzonych zmiennych pomiary uśredniano dla przedziałów czasu 10 minut. Ponadto do algorytmów pracy wprowadzono dwie stałe: temperaturę progową T_{PD} (wynoszącą 18°C), poniżej której należy dogrzewać uprawiane rośliny i temperaturę progową T_{PS} (wynoszącą 20°C), powyżej której należy schładzać uprawiane rośliny. Pierwszą stałą przyjęto również jako wartość graniczną temperatury powietrza pomiędzy roślinami, która musiała zostać osiągnięta aby można było rozpocząć ładowanie. W przeciwnym razie, tj. gdyby ładowanie akumulatora zaczynało się przy niższej temperaturze w tunelu, uprawiane rośliny dłużej by rosły w mniej korzystnych warunkach. Porównanie temperatury zmierzonej wśród uprawianych roślin z założonymi wartościami brzegowymi pozwalało na włączenie trybu ładowania lub rozładowywania akumulatora (Rys. 12).



Rys. 12. Schemat blokowy wyboru trybu pracy akumulatora

Efektywność ładowania akumulatora zależy od różnicy temperatur złoża i wtłaczanego do niego powietrza, w związku z tym przyjęto, że cykl ładowania rozpoczynał się gdy różnica tych temperatur (ΔT_{PL}) przekraczała wartość 4°C. W przypadku rozładowywania akumulatora w celu dogrzewania roślin różnicę tą (ΔT_{PR}) przyjęto na poziomie 2°C. Przyjęcie mniejszej granicznej różnicy temperatur oznaczało wprawdzie mniejszą efektywność wymiany ciepła pomiędzy złożem, a wtłaczanym powietrzem, jednak priorytetem było jak najwcześniejsze rozpoczęcie dogrzewania roślin.

Jako sygnał do wyłączania pracy akumulatora przyjęto różnicę temperatur powietrza na wejściu i wyjściu z akumulatora. Wyznaczenie momentu wyłączania cyklu ładowania lub rozładowywania akumulatora wymaga wyznaczenia granicznej wartości dla różnicy tych zmiennych. W tym celu do algorytmów pracy wprowadzono kolejne dwie stałe: graniczną różnicę temperatur powietrza wchodzącego do akumulatora i z niego wychodzącego $(\Delta T_{KL}=3^{\circ}C)$, przy której należy zakończyć ładowanie oraz graniczną różnicę temperatur powietrza wychodzącego z akumulatora i do niego wchodzącego ($\Delta T_{KR}=2^{\circ}C$), przy której należy zakończyć rozładowywanie. Mniejsza wartość ΔT_{KR} wynikała z potrzeby jak najdłuższego dogrzewania roślin. Algorytmy realizujące podstawowe tryby pracy akumulatora, pokazane na rysunkach 6 i 8, zostały przedstawione na rysunkach 13 i 14. Numery przepustnic użyte w przedstawionych algorytmach są zgodne z rysunkiem 5. W algorytmach użyto ponadto stałej t_{op} (równej 10 minut), która oznacza odstęp czasu od załączenia wentylatora do momentu oceny efektów pracy instalacji. Odstęp ten jest niezbędny do ustabilizowania się warunków zmian temperatury w złożu akumulatora.



Rys. 13. Algorytm sterowania trzysekcyjnym akumulatorem ciepła w trybie ładowania z kierowaniem powietrza wychodzącego poza tunel produkcyjny



Rys. 14. Algorytm sterowania trzysekcyjnym akumulatorem ciepła w trybie dogrzewania roślin (rozładowywania akumulatora) z kierowaniem powietrza wychodzącego pod uprawiane rośliny

5.2. System pomiarowy

Pomiary prędkości przepływu powietrza przez akumulator wykonywano przy użyciu anemometrów MiniAir64 Mini (dokładność $\pm 0,2 \text{ m s}^{-1}$; Schiltknecht Messtechnik AG, Gossau, Szwajcaria) umiejscowionych w układzie zasysania powietrza (Rys. 15) przez wentylator. Temperaturę mierzono czujnikami rezystancyjnymi Pt1000 (dokładność $\pm 0,1^{\circ}$ C; prod. DKR-Elektronik, Polska) umieszczonymi w układzie zasysania powietrza, układzie wylotowym powietrza z akumulatora oraz w środku każdej sekcji akumulatora w połowie głębokości złoża.



Rys. 15. Rozmieszczenie punktów pomiarowych do monitorowania stanu akumulatora oraz przepływającego przez niego powietrza

Wilgotność względna powietrza przepływającego przez akumulator była mierzona czujnikami SEM161 (dokładność ±2% w zakresie wilgotności 10÷90%; prod. Status Instruments Ltd., Wielka Brytania), umieszczonymi w układzie zasysania powietrza oraz układzie wylotowym powietrza z akumulatora (Rys. 15). Parametry powietrza wewnątrz tunelu uprawowego mierzono w centralnej części tunelu, pomiędzy roślinami na wysokości 1,5 m, oraz w górnej części tunelu nad kurtyną izolacyjno-cieniującą, w połowie jej wysokości. Ponadto na zewnątrz tunelu, 0,5 m nad jego ścianą szczytową, monitorowano następujące parametry środowiskowe: natężenie promieniowania słonecznego przy użyciu pyranometru 1 klasy LP PYRA 02 (prod. Delta Ohm s.r.l., Włochy) oraz temperaturę i wilgotność względną powietrza przy pomocy meteorologicznego przetwornika wilgotności i temperatury powietrza HD9008TRR z osłoną antyradiacyjną HD 9007-A2 (prod. Delta Ohm s.r.l., Włochy). Wszystkie monitorowane parametry mierzono w sposób ciagły i zapisywano w rejestratorze KSP (prod. DKR-Elektronik, Polska) co 120 sekund. Wartości pomiarowe były również wykorzystywane do sterowania pracą akumulatora w czasie rzeczywistym za pośrednictwem tego samego 16 bitowego rejestratora. W celu poprawienia czytelności otrzymanych wyników, uzyskane dane przed ich analizą statystyczną przeliczano dla okresów 1-godzinnych.

5.3. Metodyka obliczeń

Ciepło magazynowane w złożu akumulatora można opisać następującym równaniem:

.

$$\dot{Q}_{AK} = \dot{Q}_{WE} - \dot{Q}_{WY} \pm \dot{Q}_{FAZ} + \dot{Q}_{STR} \tag{1}$$

.

(T 1)

gdzie:

| Qwe | _ | strumien ciepia wchodzący do złoża akumulatora, (J·S ⁺) |
|------------------|---|---|
| Q_{WY} | _ | strumień ciepła wychodzący ze złoża akumulatora, (J·s ⁻¹) |
| Qfaz | _ | strumień ciepła będący skutkiem przemian fazowych (parowania lub skrapla- |
| | | nia) w złożu akumulatora, (J·s ⁻¹) |
| Q _{STR} | _ | strumień ciepła tracony podczas pracy akumulatora, (J·s ⁻¹) |

Ciepło wchodzące do złoża akumulatora wraz ze strumieniem zatłaczanego powietrza jest sumą ciepła suchego powietrza oraz ciepła pary wodnej w nim zawartej i zależy od strumienia zatłaczanego powietrza, ciepła właściwego suchego powietrza, zawartości pary wodnej w powietrzu, ciepła właściwego pary wodnej i temperatury:

$$\dot{Q}_{WE} = (\dot{m}_g \cdot c_{p,g} + \dot{m}_{p,WE} \cdot c_{p,p}) \frac{dT_{WE}}{d\tau}$$
(2)

gdzie:

| mg | _ | masa strumienia suchego powietrza, (kg·s ⁻¹) |
|-------------------|---|---|
| $c_{p,g}$ | _ | ciepło właściwe suchego powietrza przy stałym ciśnieniu, (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹) |
| m _{p,WE} | _ | masa strumienia pary wodnej na wejściu do akumulatora, (kg·s ⁻¹) |
| c _{p,p} | _ | ciepło właściwe pary wodnej przy stałym ciśnieniu, (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹) |
| T_{WE} | _ | temperatura zatłaczanego powietrza, (K) |

Analogicznie, ciepło wychodzące ze złoża wraz ze strumieniem powietrza można opisać równaniem:

$$\dot{Q}_{WY} = (\dot{m}_g \cdot c_{p,g} + \dot{m}_{p,WY} \cdot c_{p,p}) \frac{dT_{WY}}{d\tau}$$
(3)

gdzie:

 $\begin{array}{lll} m_g & - & masa \ strumienia \ suchego \ powietrza, \ (kg\cdot s^{-1}) \\ c_{p,g} & - & ciepło \ właściwe \ suchego \ powietrza \ przy \ stałym \ ciśnieniu, \ (J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}) \\ m_{p,WY} & - & masa \ strumienia \ pary \ wodnej \ na \ wyjściu \ z \ akumulatora, \ (kg\cdot s^{-1}) \\ T_{WY} & - & temperatura \ powietrza \ wychodzącego \ z \ akumulatora, \ (K) \end{array}$

Ciepło przemiany fazowej wody może mieć znak dodatki lub ujemny, w zależności czy w danym momencie zachodzi skraplanie pary wodnej do złoża czy parowanie wody ze złoża, przy założonej jednorodności warunków temperatury i wilgotności w złożu. Ciepło przemiany fazowej zależy od masy wody/pary wodnej ulegającej przemianie oraz ciepła parowania wody:

$$\dot{Q}_{FAZ} = r(T) \cdot \frac{dm_{p,FAZ}}{d\tau} \tag{4}$$

gdzie:

r(T) – ciepło parowania wody w danej temperaturze, (J·kg⁻¹)

m_{p,FAZ} – masa wody zmieniająca stan skupienia, (kg)

Masa wody zmieniająca stan skupienia jest wynikiem bilansu mas strumieni pary wodnej na wejściu i na wyjściu z akumulatora:

$$dm_p = \left(dm_{p,WE} - dm_{p,WY}\right)d\tau \tag{5}$$

gdzie:

 $m_{p,WE}$ – masa strumienia pary wodnej na wejściu do akumulatora, (kg s⁻¹)

 $m_{p,WY}$ – masa strumienia pary wodnej na wyjściu z akumulatora, (kg·s⁻¹)

Straty ciepła Q_{STR} składają się ze strumienia ciepła przenikającego wszystkie ściany akumulatora oraz z ciepła wychodzące ze złoża z powietrzem wypływającym przez nieszczelności izolacji górnej akumulatora oraz otworów, przez które przechodzą rury PCW doprowadzające i odprowadzające powietrze. W sytuacji braku danych o różnicach temperatur wewnątrz i na zewnątrz każdej ze ścian akumulatora oraz o wielkości strumienia powietrza wypływającego przez nieszczelności oraz jego temperaturze i wilgotności, strat tych nie można obliczyć bezpośrednio. Można je obliczyć z bilansu długookresowego akumulatora, np. jako:

$$\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \dot{Q}_{STR} = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \dot{Q}_{LAD} - \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \dot{Q}_{ROZLAD} - \Delta Q_{AK}$$
(6)

gdzie:

Q_{LAD} – ciepło magazynowane podczas ładowania akumulatora,

QROZŁAD - ciepło odbierane podczas rozładowywania akumulatora,

 ΔQ_{AK} – zmiana stanu naładowania akumulatora,

 $\Delta \tau$ – rozpatrywany okres czasu.

5.3.1. Wielkości charakteryzujące wilgotność powietrza

Aby wyznaczyć deficyt ciśnienia pary wodnej (VPD) można obliczyć, zgodnie z PN-EN ISO 13788 (2003), ciśnienie nasyconej pary wodnej w powietrzu:

$$p_{nas} = 610.5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot T}{237,5 + T}} \tag{7}$$

gdzie:

T – temperatura powietrza, (°C), dla T \ge 0°C

oraz aktualne ciśnienie pary wodnej:

$$p_p = \varphi \cdot p_{nas} \tag{8}$$

gdzie:

φ – wilgotność względna powietrza, (%)
 p_{nas} – ciśnienie nasyconej pary wodnej w powietrzu, (Pa)

Deficyt ciśnienia pary wodnej oblicza się korzystając z równania:

$$VPD = p_{nas} - p_p \tag{9}$$

gdzie:

p_{nas} – ciśnienie nasyconej pary wodnej w powietrzu, (Pa)
 p_p – aktualne ciśnienie pary wodnej w powietrzu, (Pa)

Przy czym, zgodnie z prawem Daltona, całkowite ciśnienie powietrza wilgotnego jest sumą ciśnienia składnikowego powietrza suchego i ciśnienia składnikowego pary wodnej zawartej w powietrzu:

$$p = p_g + p_p \tag{10}$$

gdzie:

pg – ciśnienie powietrza suchego, (Pa)
 pp – ciśnienie pary wodnej zawartej w powietrzu, (Pa)

Do obliczenia entalpii powietrza należy najpierw obliczyć zawartość wilgoci w powietrzu. Dla wilgotnego gazu nienasyconego stopień wilgoci, zwany również zawilżeniem, jest stosunkiem masy pary wodnej lotnej, czyli nieskondensowanej, do masy suchego powietrza:

$$X = \frac{m_p}{m_g} \tag{11}$$

gdzie:

m_p – masa pary wodnej lotnej, (kg) m_g – masa suchego powietrza, (kg)
Parę wodną zawartą w powietrzu, ze względu na jej niskie ciśnienie i względnie umiarkowaną temperaturę można traktować jako gaz doskonały. Wtedy para spełnia równanie stanu Clapeyrona (Massalski i Massalska, 1973):

$$p_p \cdot V = \frac{m_p}{M_p} \cdot R \cdot T \tag{12}$$

gdzie:

p_p – aktualne ciśnienie pary wodnej zawartej w powietrzu, (Pa)

V – objętość w której zawiera się dana masa pary, (m³)

m_p – masa pary, (kg)

M_p – masa cząsteczkowa pary, (kg·mol⁻¹)

R=8,31446 J·mol⁻¹·K⁻¹ – uniwersalna stała gazowa

T – temperatura powietrza, (K)

Podstawiając równania 12, 10 oraz 8 do równania 11 otrzymujemy wzór na zawartość wilgoci w powietrzu:

$$X = \frac{M_p}{M_g} \cdot \frac{\varphi \cdot p_{nas}}{p - \varphi \cdot p_{nas}}$$
(13)

gdzie:

M_p=18,016 kg·kmol⁻¹ – masa molowa pary, czyli wody
M_g=28,97 kg·kmol⁻¹ – masa molowa suchego powietrza
φ – wilgotność względna powietrza, (%)
p_{nas} – ciśnienie nasyconej pary wodnej w powietrzu, (Pa)
p – całkowite ciśnienie powietrza wilgotnego, czyli aktualne ciśnienie atmosferyczne, (Pa)

Obliczenie zawartości wilgoci w powietrzu jest niezbędne do obliczenia bilansu masy wody w złożu akumulatora. Różnica pomiędzy masą wody wchodzącą do akumulatora jako para wodna w strumieniu wtłaczanego powietrza, a masą wody wydostającą się z akumulatora wraz z wypływającym z niego powietrzem, pozwala na określenie, czy w rozpatrywanym przedziale czasu następowało skraplanie pary wodnej w złożu akumulatora, czy też następowało parowanie wody już znajdującej się w złożu. W pierwszym przypadku zawartość wilgoci w powietrzu wtłaczanym do akumulatora jest większa niż w powietrzu wypływającym z akumulatora. W drugim przypadku jest odwrotnie.

5.3.2. Wielkości charakteryzujące entalpię powietrza

Entalpia powietrza wilgotnego jest sumą entalpii powietrza suchego oraz zawartej w nim pary wodnej:

$$dI = \left(m_g \cdot i_g + m_p \cdot i_p\right) d\tau \tag{14}$$

gdzie:

| mg | _ | masa strumienia suchego powietrza, (kg·s ⁻¹) |
|----------------|---|--|
| ig | _ | entalpia właściwa suchego powietrza, (J·kg ⁻¹) |
| m _p | _ | masa strumienia pary wodnej, (kg·s ⁻¹) |
| ip | _ | entalpia właściwa pary wodnej, (J·kg ⁻¹) |

Zakłada się, że powietrze wilgotne ma entalpię równą zeru dla temperatury i ciśnienia punktu potrójnego T₀=273,16 K (czyli 0,01°C), p₀=611,7 Pa. W związku z tym, entalpię właściwą suchego powietrza oblicza się korzystając z równania:

$$i_g = c_{p,g} \cdot (T - T_0)$$
 (15)

gdzie:

 $c_{p,g}$ =1,005 kJ·kg⁻¹·K⁻¹ – ciepło właściwe powietrza suchego przy stałym ciśnieniu

T – aktualna temperatura powietrza, (K)

T₀=273,16 K - temperatura punktu potrójnego

a entalpię właściwą pary wodnej oblicza się korzystając z równania:

$$i_p = r_0 + c_{p,p} \cdot (T - T_0) \tag{16}$$

gdzie:

 $r_0=2501 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ – ciepło parowania wody dla T=T₀=273,16 K c_{p,p}=1,88 kJ·kg⁻¹·K⁻¹ – ciepło właściwe pary przy stałym ciśnieniu T – aktualna temperatura powietrza, (K) T₀=273,16 K – temperatura punktu potrójnego

Podstawiając do równania 14 równania 15, 16 i 11 otrzymujemy równanie entalpii powietrza wilgotnego:

$$dI = \{m_g \cdot c_{p,g} \cdot (T - T_0) + X \cdot m_g \cdot [r_0 + c_{p,p} \cdot (T - T_0)]\} d\tau$$
(17)

gdzie:

 $\begin{array}{ll} m_g & - \mbox{ masa strumienia powietrza, (kg\cdot s^{-1})} \\ c_{p,g} = 1,005 \mbox{ kJ} \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} - \mbox{ ciepło właściwe powietrza suchego przy stałym ciśnieniu} \\ T & - \mbox{ aktualna temperatura powietrza, (K)} \\ T_0 = 273,16 \mbox{ K} - \mbox{ temperatura punktu potrójnego} \\ X & - \mbox{ zawartość wilgoci w powietrzu, (kg_{H2O} \cdot kg_{s.pow.}^{-1})} \\ r_0 = 2501 \mbox{ kJ} \cdot kg^{-1} - \mbox{ ciepło parowania wody dla } T = T_0 = 273,16 \mbox{ K} \\ c_{p,p} = 1,88 \mbox{ kJ} \cdot kg^{-1} - \mbox{ ciepło właściwe pary przy stałym ciśnieniu} \end{array}$

Ciepło oddawane przez przepływający strumień powietrza do złoża akumulatora można obliczać z bilansu entalpii:

$$dQ_{AK} = (dI_{WE} - dI_{WY})d\tau \tag{18}$$

gdzie:

 I_{WE} – entalpia powietrza zatłaczanego do akumulatora ciepła, (J·s⁻¹)

 I_{WY} – entalpia powietrza wychodzącego z akumulatora, (J·s⁻¹)

W przypadku procesu ładowania akumulatora, gdy $I_{WE} > I_{WY}$, Q_{AK} ma wartość dodatnią i ilość ciepła zgromadzonego w akumulatorze Q_{LAD} (zwana dalej w skrócie "ciepłem ładowania") można zapisać jako:

$$\dot{Q}_{kAD} = \dot{Q}_{AK} \tag{19}$$

W przypadku procesu rozładowywania akumulatora, gdy $I_{WE} < I_{WY}$, Q_{AK} ma wartość ujemną i ilość ciepła pobieranego z akumulatora Q_{ROZLAD} (zwana dalej w skrócie "ciepłem rozładowywania") należy zapisać jako wartość bezwzględną z Q_{AK} :

$$\dot{Q}_{ROZLAD} = \left| \dot{Q}_{AK} \right| \tag{20}$$

5.3.3. Bilans ciepła związanego z przemianami fazowymi wody

Zmiana zawartości wody w złożu akumulatora jest obliczana wzorem:

$$\Delta m_p = v \cdot S \cdot \rho \cdot \int_{\tau}^{\tau + \Delta \tau} (X_{WE} - X_{WY}) \, d\tau \tag{21}$$

gdzie:

 $\begin{array}{lll} v & - & \mbox{prędkość powietrza w odcinku pomiarowym, (m \cdot s^{-1}) \\ S & - & \mbox{pole powierzchni przekroju odcinka w którym mierzono prędkość, (m^2) \\ \rho & - & \mbox{gęstość powietrza, (kg \cdot m^{-3}) } \\ X_{WE} & - & \mbox{zawartość wilgoci w powietrzu zatłaczanym do akumulatora ciepła, (kg \cdot kg^{-1}) \\ X_{WY} & - & \mbox{zawartość wilgoci w powietrzu wychodzącym z akumulatora, (kg \cdot kg^{-1}) \\ \Delta \tau & - & \mbox{rozpatrywany okres czasu, (s) } \end{array}$

Jeżeli z bilansu strumienia masy pary wodnej na wejściu i wyjściu z akumulatora wynika, że jakaś ilość pary wodnej uległa skropleniu w złożu, lub z niego odparowała, to ciepło oddane tych przemian fazowych należy uwzględnić w bilansie ciepła w złożu akumulatora (równanie 1). Zgodnie z równaniem 4 ilość ciepła potrzebna do odparowania lub skroplenia wody zależy od masy tej wody i wartości ciepła parowania wody w danej temperaturze. Wartości te są podawane w tablicach dla różnych zakresów temperatur. Doniec (1981) podaje wartości ciepła parowania wody dla zakresu temperatur 0-100°C, co 1°C. Dane tablicowe ciepła parowania można interpolować wielomianami potęgowymi od stopnia trzeciego (Pudlik, 2011) do piątego (Gutkowski i Kapusta, 2014). Wyznaczono współczynniki wielomianu trzeciego stopnia dla wartości ciepła parowania podawanych przez Dońca (1981), przy wartości współczynnika determinacji R²=100% i błędzie standardowym oceny wynoszącym 0,320:

$$r(T) = 2501,5 - 2,415 \cdot T + 0,001337 \cdot T^2 - 1,633e - 005 \cdot T^3$$
(22)

gdzie:

T – temperatura, (°C)

Ciepło przemian fazowych, obliczone na podstawie równań 4 i 22, ma znak zgodny z ciepłem magazynowanym w złożu akumulatora jeżeli zachodzi zjawisko parowania wody ze złoża, a znak przeciwny do ciepła magazynowanego w złożu akumulatora, gdy zachodzi zjawisko skraplania pary wodnej w złożu. Parowanie wody ze złoża w trakcie ładowania akumulatora oznacza, że do akumulatora dostarczono więcej ciepła niż wykazywane bilansem entalpii na wejściu i wyjściu z akumulatora (równanie 18) i Q_{FAZ} ma taki sam znak jak Q_{AK}, czyli dodatni. W przypadku rozładowywania akumulatora zachodzenie zjawiska parowania wody ze złoża akumulatora oznacza, że oprócz ilości ciepła odebranego z akumulatora wykazywanego bilansem entalpii na wejściu i wyjściu z akumulatora (równanie 18) ze złoża akumulatora zostało odebrane również ciepło zużyte na parowanie wody. W tej sytuacji zarówno Q_{AK} jak i Q_{FAZ} mają wartości ujemne.

Zachodzenie zjawiska skraplania pary wodnej w złożu akumulatora podczas ładowania akumulatora oznacza, że w akumulatorze powstaje dodatkowa ilość ciepła, która prawdopodobnie w większości jest przejmowana przez przepływający strumień powietrza i razem z nim usuwana z akumulatora. Ponieważ podczas ładowania Q_{AK} oznacza ciepło przyjęte przez akumulator z przepływającego powietrza, to Q_{FAZ} ma znak przeciwny do Q_{AK} , czyli ujemny. W przypadku rozładowywania akumulatora zachodzenie zjawiska skraplania pary wodnej w złożu akumulatora oznacza, że ilość ciepła wykazywana bilansem entalpii na wejściu i wyjściu z akumulatora (Q_{AK}) jest w rzeczywistości ilością ciepła odebranego z akumulatora zwiększaną o ciepło powstałe podczas skraplania pary wodnej. W tej sytuacji wielkość Q_{AK} należy pomniejszyć o wielkość Q_{FAZ} , czyli ich znaki są przeciwne.

Analogicznie do równań 19 i 20 strumień ciepła gromadzonego w akumulatorze podczas ładowania skorygowanego o bilans przemian fazowych Q_{LAD+FAZ} (zwana dalej w skrócie "skorygowanym ciepłem ładowania") można zapisać jako:

$$\dot{Q}_{\pm AD + FAZ} = \dot{Q}_{AK} \pm \dot{Q}_{FAZ} \tag{23}$$

gdzie:

 Q_{AK} – strumień ciepła przyjmowany przez akumulator podczas ładowania, (J s⁻¹)

 Q_{FAZ} – strumień ciepła będący skutkiem przemian fazowych wody, (J·s⁻¹)

W przypadku procesu rozładowywania akumulatora Q_{AK} ma wartość ujemną i strumień ciepła pobieranego z akumulatora skorygowanego o bilans przemian fazowych Q_{ROZŁAD+FAZ} (zwana dalej w skrócie "skorygowanym ciepłem rozładowywania") należy zapisać jako wartość bezwzględną:

$$\dot{Q}_{ROZLAD+FAZ} = \left| \dot{Q}_{AK} \pm \dot{Q}_{FAZ} \right| \tag{24}$$

gdzie:

Q_{AK} – strumień ciepła odbierany z akumulatora podczas rozładowywania, (J·s⁻¹)
Q_{FAZ} – strumień ciepła będący skutkiem przemian fazowych wody, (J·s⁻¹)

5.4. Okresy badawcze

W okresie od 9 kwietnia do 30 maja 2013 roku przeprowadzono badania wpływu warunków środowiskowych i początkowej temperatury złoża na ilość ciepła magazynowaną w akumulatorze i z niego oddawaną. Badania prowadzono w akumulatorze nr 2 (Rys. 2) przy użyciu wszystkich sekcji złoża. Strumień zatłaczanego powietrza wynosił od 0,18 do 0,20 m³·s⁻¹ podczas ładowania akumulatora oraz od 0,21 do 0,23 m³·s⁻¹ podczas rozładowywania akumulatora. W celu zapewnienia parametrów powietrza zbliżonych do tych występujących w produkcji towarowej, w tunelu foliowym nad akumulatorem uprawiano warzywa.

W okresie od 17 maja do 7 sierpnia 2013 roku przeprowadzono badania wpływu wielkości strumienia zatłaczanego powietrza oraz objętości złoża na ilość ciepła gromadzoną w akumulatorze oraz z niego odzyskiwaną. Badania prowadzono w akumulatorze nr 1 (Rys. 2), dla następujących objętości złoża: 12,7 m³ (sekcja nr 3, Rys. 15), 26,1 m³ (sekcja nr 1) i 51,5 m³ (sekcje nr 1, 2 i 3). Badania obejmowały zakres wielkości strumienia powietrza od 0,029 do 0,306 m³·s⁻¹. W tunelu foliowym nad akumulatorem uprawiano warzywa.

W okresie od 11 kwietnia do 26 sierpnia 2014 roku badano wpływ zastosowania akumulatora na mikroklimat w tunelu ogrodniczym. Badania objęły trzy tunele (Rys. 2), w których uprawiano warzywa. Dwa tunele (nr 1 i 2, Rys. 2) współpracowały z akumulatorami ciepła, natomiast jeden tunel był obiektem kontrolnym. W pierwszym etapie, w okresie od 11 kwietnia do 30 czerwca, oba akumulatory ciepła (nr 1 i 2) pracowały w trybie dogrzewania roślin w nocy i chłodne dni. Na początku lipca 2014 roku w akumulatorze nr 2 zmieniono tryb pracy z dogrzewania roślin w nocy na schładzanie ich w dzień i w okresie od 11 lipca do 26 sierpnia badano wpływ takiego trybu pracy akumulatora na mikroklimat w tunelu foliowym.

W celu porównania stanu mikroklimatu w tunelach foliowych z akumulatorami ciepła i tunelu kontrolnym, dane pomiarowe zebrane w kolejnych miesiącach podzielono na grupy według wielkości natężenia promieniowania słonecznego. Wydzielono dziewięć grup wielkości natężenia promieniowania słonecznego: 0÷5, 5÷100, 100÷200, 200÷300, 300÷400, 400÷500, 500÷600, 600÷700 i 700÷800 W·m⁻². Pierwsza, o zakresie natężenia promieniowania od 0 do 5 W·m⁻², została nazwana "Noc". Górna granica zakresu, tj. 5 W·m⁻², została ustalona w celu wyeliminowania wpływu przypadkowych chwilowych zmian odczytów spowodowanych aktywnością okolicznych mieszkańców. Kolejnych osiem grup wyznaczono arbitralnie dla całkowitego zakresu od 5 do 800 W·m⁻², co stanowi okres od świtu do środka dnia, a później w odwrotnej kolejności do zmierzchu. W najbardziej słoneczne dni maksymalna wartość natężenia promieniowania słonecznego przekraczała wprawdzie 800 W·m⁻², lecz były to okresy nieregularne i zostały w analizie pominięte. Dane środowiskowe podzielone według przyjętych grup wielkości natężenia nasłonecznienia poddano jednoczynnikowej analizie wariancji, osobno dla każdej grupy wielkości promieniowania.

5.5. Obliczenia statystyczne

Obliczenia statystyczne prowadzono przy użyciu oprogramowania Dell Statistica w wersji 13.

Oszacowanie parametrów wielomianu przeprowadzono przy użyciu modułu Ogólne Modele Liniowe (GLM) dla wartości poziomu ufności 0,05, delty wymiatania 1E-6, delty odwracania 1E-12 oraz sumy kwadratów typu VI. Badania korelacji przeprowadzono przy użyciu modułu Statystyki podstawowe i tabele – Macierze korelacji.

Analizę regresji wielorakiej przeprowadzono przy użyciu modułu Regresja wieloraka dla wartości tolerancji 0,0001 oraz wartości parametru regresji krokowej F do wprowadzania 11.

Analizę wariancji przeprowadzono przy użyciu modułu ANOVA dla poziomu istotności 0,05, a grupy jednorodne wyznaczano testem Duncana dla poziomu $\alpha = 0,05$.

Wyniki analiz istotne statystycznie zaznaczono kolorem czerwonym.

6. WYNIKI BADAŃ

6.1. Ogólna charakterystyka pracy akumulatora

W sezonie 2013 roku pracę akumulatora rozpoczęto w dniu 20 marca od wstępnego ładowania złoża ciepłem, co spowodowało jego osuszanie. Było to możliwe dzięki okresowi słonecznej pogody. Pomimo nadal bardzo niskiej temperatury powietrza na zewnątrz tuneli, która w ciągu dnia w trzeciej dekadzie marca wynosiła średnio -0,9°C, temperatura w środku tuneli w ciągu dnia wynosiła średnio 11,9°C, okresowo przekraczając 29°C. Temperatura powietrza w górnej części tunelu, skąd było zasysane powietrze, wynosiła średnio w ciągu dnia 14,8°C, osiągając chwilami 34°C. W dniu 9 kwietnia posadzono rośliny pomidora w tunelach, a pracę akumulatora ciepła przestawiono na procedurę ładowania w dzień i rozładowywania w nocy zgodnie ze schematem blokowym przedstawionym na rysunku 12. Ładowanie poszczególnych sekcji odbywało się szeregowo, zgodnie ze algorytmem przedstawionym na rysunkach 13 i 14, a rozładowywanie poszczególnych sekcji odbywało się równolegle, zgodnie z algorytmem przedstawionym na rysunku 14. O ile w pierwszej dekadzie kwietnia czas ładowania wyniósł średnio tylko 4,0 godziny (Rys. 16), to już w kolejnej dekadzie, dzięki wzrostowi nasłonecznienia i temperatury powietrza średni czas ładowania wydłużył się do 8,4 godziny. Większa ilość zgromadzonego w akumulatorze ciepła pozwoliła również na długie dogrzewanie roślin posadzonych w tunelu. Średni czas rozładowywania akumulatora w pierwszej dekadzie kwietnia wyniósł zaledwie 3,1 godziny i w rzeczywistości był średnią z dwóch dni pracy akumulatora po posadzeniu roślin: 9 i 10 kwietnia. W kolejnej dekadzie wzrósł do 12,8 godziny. Dalszy wzrost nasłonecznienia w kolejnych dekadach powodował wydłużanie czasu ładowania akumulatora, aż do drugiej dekady maja, gdy średnia temperatura powietrza w nocy osiągnęła poziom na tyle zbliżony do wymagań uprawianych roślin, że czas ewentualnego dogrzewania roślin zmniejszył się znacząco (Tab. 1). Okres chłodów w trzeciej dekadzie maja, spowodowany opóźnionym w stosunku do lat poprzednich zjawiskiem klimatycznym zwanym popularnie "zimnymi ogrodnikami", spowodował chwilowy wzrost zapotrzebowania na dogrzewanie roślin, przez co skrócił się czas ładowania (Tab. 1). Widoczne w okresie czerwiec-lipiec skoki w nasłonecznieniu odzwierciedliły się w wahaniach długości czasu ładowania akumulatora. Ostatni okres długiego ładowania akumulatora nastąpił w pierwszej dekadzie sierpnia. Od tamtej pory sukcesywny spadek nasłonecznienia skracał stopniowo długość czasu ładowania, natomiast równoległy sukcesywny spadek nocnych temperatur otoczenia zwiększał zapotrzebowanie na dogrzewania roślin i wydłużał czas rozładowywania akumulatora. Oba te zjawiska spowodowały spadek udziału czasu ładowania w całkowitym czasie pracy akumulatora z prawie 80% do poniżej 20% (Tab. 1).

Tabela 1.

Średni dobowy łączny czas cykli ładowania i rozładowywania akumulatora oraz średni udział cykli ładowania w całkowitym czasie pracy akumulatora ciepła w kolejnych dekadach sezonu 2013

| Miesiąc - dekada | Średni łączny czas ładowania i rozładowywania (h) | Średni udział cykli ładowania |
|------------------|---|-------------------------------------|
| IV - 1 | 7,1 | 57% |
| IV - 2 | 21,2 | 39% |
| IV - 3 | 22,0 | 42% |
| V - 1 | 21,2 | 48% |
| V - 2 | 18,6 | 51% |
| V - 3 | 19,2 | 34% |
| VI - 1 | 14,0 | 64% |
| VI - 2 | 16,4 | 72% |
| VI - 3 | 11,9 | 72% |
| VII - 1 | 16,2 | 76% |
| VII - 2 | 19,2 | 52% |
| VII - 3 | 17,2 | 65% |
| VIII - 1 | 13,6 | 78% |
| VIII - 2 | 19,1 | 47% |
| VIII - 3 | 22,5 | 39% |
| IX - 1 | 15,5 | 34% |
| IX - 2 | 21,1 | 17% |
| IX - 3 | 22,5 | 22% |
| X - 1 | 20,3 | 20% |
| X - 2 | 21,6 | 13% |
| X - 3 | 21,1 | 22% |



Rys. 16. Średnie dobowe czasy ładowania i rozładowywania akumulatora ciepła w kolejnych dekadach sezonu 2013 na tle średniego dobowego nasłonecznienia i średnich temperatur w nocy

6.2. Wpływ warunków środowiskowych i początkowej temperatury złoża na ilość ciepła gromadzoną i odzyskiwaną z akumulatora dla ustalonego zakresu przepływów powietrza

Ocenę wpływu warunków środowiskowych na ilość ciepła gromadzoną w akumulatorze oraz z niego odzyskiwaną ograniczono do okresu od 9 kwietnia do 30 maja. W okresie tym dobowe wartości średnie natężenia promieniowania słonecznego (Rys. 17) były zbliżone do średniej całosezonowej, która wyniosła 256 W·m⁻², natomiast średnie dekadowe wartości temperatury otoczenia mierzonej w nocy wahały się od 9,1 do 14,4°C (Rys. 18), wobec średniej całosezonowej 12,6°C.



Rys. 17. Zmiany zakresu mierzonych wartości, wartości średniej i odchylenia standardowego dla dziennego natężenia promieniowania słonecznego w kolejnych dekadach sezonu 2013 roku



Rys. 18. Zmiany zakresu mierzonych wartości, wartości średniej i odchylenia standardowego dla nocnych pomiarów temperatury otoczenia w kolejnych dekadach sezonu 2013 roku

6.2.1. Analiza pracy akumulatora podczas ładowania

Prędkość obrotowa wentylatora zatłaczającego powietrze do akumulatora została ustawiona na 1800 obr·min⁻¹, co dla docelowego ładowania wszystkich trzech sekcji akumulatora jednocześnie oznaczało strumień powietrza 0,185 m³·s⁻¹, czyli ok 670 m³·h⁻¹. Ze względu na stopniowe otwieranie przepustnic kierujących powietrze do poszczególnych sekcji złoża akumulatora oraz prawdopodobnie niedokładne zamykanie i otwieranie poszczególnych przepustnic, wielkość strumienia powietrza wahała się podczas badanego okresu pracy akumulatora, co obrazuje rysunek 19.



Rys. 19. Rozkład wielkości strumienia powietrza podczas ładowania akumulatora w okresie od 9 kwietnia do 30 maja 2013 roku

W celu wyeliminowania wpływu nieregularnych zmian wielkości strumienia powietrza przepływającego przez akumulator na ilość gromadzonego w nim ciepła obliczenia przeprowadzono dla przedziału strumienia powietrza (0,18 m³·s⁻¹; 0,2 m³·s⁻¹).

Ilość ciepła w zatłaczanym do akumulatora powietrzu zależy od intensywności radiacji słonecznej. Można więc założyć, że podstawową zmienną środowiskową determinującą ilość ciepła gromadzoną w akumulatorze jest natężenie promieniowania słonecznego. Jednak wprawdzie natężenie promieniowania słonecznego jest zmienną pierwotną to w analizie ilości ciepła gromadzonego w akumulatorze należy używać temperatury powietrza zasysanego przez wentylator (równanie 2). Dla wszystkich 1-godzinnych okresów ładowania bilans entalpii akumulatora Q_{AK}, liczony jako różnica entalpii strumienia powietrza zatłaczanego do akumulatora i z niego wypływającego (równanie 18), był pozytywnie skorelowany ze średnią

temperaturą powietrza zasysanego w tych okresach ładowania, jednak współczynnik korelacji był niewielki i wyniósł r = 0,306 (Rys. 20).

Analizując możliwą przyczynę tak niskiej wartości współczynnika korelacji, obliczono różnice zawartości wilgoci w powietrzu zatłaczanym do akumulatora i z niego wychodzącym (równanie 5). Stwierdzono zachodzenie procesów parowania wody znajdującej się w złożu akumulatora, lub skraplania pary wodnej w złożu. Bilans entalpii powietrza na wlocie do i wylocie z akumulatora skorygowano o wartości wynikające z przemian fazowych, w wyniku czego uzyskano istotny wzrost współczynnika korelacji (Rys. 21).



Rys. 20. Wpływ średniej temperatury zasysanego powietrza na bilans entalpii wejścia do i wyjścia z akumulatora dla 1-godzinnych okresów ładowania i przedziału strumienia powietrza (0,18 m³·s⁻¹; 0,2 m³·s⁻¹), przy wykorzystaniu wszystkich sekcji akumulatora



Rys. 21. Wpływ średniej temperatury zasysanego powietrza na ilość ciepła zgromadzonego w akumulatorze skorygowanego o bilans przemian fazowych wody, dla 1-godzinnych okresów ładowania i przedziału strumienia powietrza (0,18 m³·s⁻¹; 0,2 m³·s⁻¹), przy wy-korzystaniu wszystkich sekcji akumulatora

Podczas cyklu ładowania akumulatora ciepłe powietrze jest zatłaczane do chłodniejszego złoża akumulatora. Można więc oczekiwać, że spośród procesów parowania i skraplania, w czasie ładowania akumulatora będzie zachodził ten drugi. Jak jednak pokazano na rysunku 22 podczas cyklów ładowania zachodzą obydwa procesy, przy czym proces skraplania pary wodnej w złożu jest znacznie bardziej istotny. Średnie ilości wody parującej ze złoża akumulatora w poszczególnych dekadach wyniosły od 454 g do 1326 g na godzinę pracy akumulatora. Odpowiada to ilości ciepła pobranego podczas procesów podgrzewania i parowania wody w złożu akumulatora od 229 do 954 kJ. Natomiast średnie ilości wody skraplającej się w złożu akumulatora w poszczególnych dekadach były 3÷4 krotnie większe i wyniosły od 1787 g do 3314 g na godzinę pracy akumulatora. Odpowiada to ilości ciepła oddanego podczas procesów schładzania i kondensacji pary wodnej w złożu akumulatora od 2483 do 5800 kJ.



Rys. 22. Masa wody parującej ze złoża akumulatora (wartości ujemne) i skraplającej się w złożu (wartości dodatnie) podczas ładowania akumulatora w kolejnych dekadach sezonu 2013 roku, przy wykorzystaniu wszystkich sekcji akumulatora. Średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie (ANOVA, test Duncana, $p \le 0,05$, oddzielnie dla parowania i skraplania)

Ilości ciepła oddawanego podczas skraplania pary wodnej w kolejnych godzinach cyklów ładowania przedstawiono na rysunku 23. Ujemne wartości przyporządkowane skraplaniu wskazują, że proces skraplania pary wodnej powoduje zmniejszenie ilości ciepła ujętego bilansem entalpii Q_{AK}. Przeprowadzona analiza wskazuje, że najwięcej pary ulega skropleniu na początku cyklów ładowania. Średnia ilość ciepła oddawanego podczas schładzania i skraplania pary w złożu akumulatora podczas pierwszej godziny ładowania wyniosła 7765 kJ, co odpowiadało schłodzeniu i skropleniu 3670 g wody. W drugiej godzinie ładowania średnia ilość ciepła oddawanego podczas schładzania i skraplania ilość ciepła oddawanego podczas schładzania i skraplania pary zmniejszyła się do 4932 kJ, co odpowiadało schłodzeniu i skropleniu 2537 g wody. W kolejnych godzinach cyklów ładowania ilość ciepła zmniejszała się dalej osiągając w ósmej godzinie 2722 kJ, a w dziesiątej godzinie 1100 kJ, co odpowiadało schłodzeniu i skropleniu i skropleniu odpowiednio 1943 g i 1464 g wody.



Rys. 23. Ilość ciepła oddawanego podczas schładzania i skraplania pary wodnej w kolejnych godzinach cyklów ładowania, przy wykorzystaniu wszystkich sekcji akumulatora. Średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie (ANOVA, test Duncana, $p \le 0,05$)

Pomimo dominującego charakteru zjawiska skraplania pary wodnej, w niektórych cyklach ładowania obserwowano także zjawisko parowania wody ze złoża akumulatora. Zjawisko to najczęściej trwało tylko przez część cyklu ładowania i, jak można wnioskować z rysunku 24, nasilało się w późniejszych godzinach cyklów ładowania. Średnia ilość ciepła pobieranego podczas podgrzewania i parowania wody ze złoża w pierwszej godzinie cyklów ładowania wynosiła 178 kJ, co odpowiadało podgrzaniu i odparowaniu 1040 g wody. W czwartej godzinie ładowania ilość ciepła wyniosła 356 kJ, co odpowiadało podgrzaniu i odparowaniu 770 g wody. W kolejnych godzina ładowania ilość ciepła pobranego podczas podgrzewania i parowania wody ze złoża zwiększała się i w dziesiątej godzinie wyniosła 1662 kJ, co odpowiadało podgrzaniu i odparowaniu 1022 g wody. Wzrost ilości pobranego ciepła nieproporcjonalny do ilości odparowanej wody wynikał ze zmian temperatury i wilgotności powietrza zatłaczanego do akumulatora i z niego wypływającego podczas upływu czasu ładowania.



Rys. 24. Ilość ciepła pobieranego podczas ogrzewania i parowania wody ze złoża w kolejnych godzinach cyklów ładowania, przy wykorzystaniu wszystkich sekcji akumulatora. Średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie (ANOVA, test Duncana, $p \le 0,05$)

Chociaż ilość ciepła gromadzonego w złożu akumulatora, po uwzględnieniu bilansu przemian fazowych wody, zależy istotnie od temperatury powietrza zasysanego przez wentylator z górnej części tunelu (Rys. 21), to nie jest to jedyny parametr środowiskowy lub związany ze stanem akumulatora, który może wpływać na ilość gromadzonego ciepła. Analiza współzależności mierzonych i obliczanych zmiennych (Tab. 2) wykazała, że wysokie współczynniki korelacji cechowały wpływ nasłonecznienia R, wymienionej powyżej temperatury zasysanego powietrza Tzas i temperatury powietrza wewnątrz tunelu pomiędzy uprawianymi roślinami Trośl na ciepło ładowania skorygowane o bilans przemian fazowych wody Q_{LAD+FAZ}. Wysoki współczynnik korelacji uzyskano również dla zmiennej będącej różnicą średnich temperatur zasysanego powietrza i temperatur złoża przed rozpoczęciem cyklu ładowania $\Delta T_{zas-zloža}$, pomimo, że sama temperatura złoża przed rozpoczęciem cyklu ładowania $T_{zloża}$ nie cechowała się istotną współzależnością. Wysoki współczynnik korelacji spowodował włączenie zmiennej obliczeniowej $\Delta T_{zas-złoża}$ do dalszych analiz. Istotną korelację uzyskano również dla średniej temperatury otoczenia Tzew, lecz była ona mniejsza ponieważ zmienna ta podlegała wpływowi jeszcze innych czynników zewnętrznych, takich jak np. wiatr, które miały znacznie mniejszy wpływ na pracę akumulatora. Brak współzależności pomiędzy skorygowanym ciepłem ładowania $Q_{LAD+FAZ}$ oraz strumieniem zatłaczanego powietrza q_{pow} był z kolei spowodowany ograniczeniem analizowanych wartości tej zmiennej do wąskiego zakresu. Podobnie brak istotnej korelacji pomiędzy wartościami ciepła ładowania, obliczanymi obiema metodami, a średnią temperaturą złoża przed rozpoczęciem cyklu ładowania był spowodowany wąskim zakresem zmierzonych temperatur złoża. Wprawdzie całkowity zakres 128 zmierzonych wartości temperatury $T_{zloża}$ wynosił 16,6÷22,7°C, to ponad ³/4 tych wartości, a dokładnie 99, mieściło się w zakresie 16,6÷19,1°C.

Tabela 2.

Współczynniki korelacji pomiędzy ciepłem ładowania, obliczanym dwoma metodami, a wybranymi zmiennymi pomiarowymi wyznaczone dla 1-godzinnych okresów ładowania akumulatora i zakresu strumienia powietrza $0,18\div0,20$ m³·s⁻¹

| | Współczynniki korelacji r Pearsona oraz poziomy ich istotności p | | | |
|---|--|--|--|--|
| Zmienna niezależna | Ciepło ładowania skorygowane o bilans przemian fazowych wody Q _{LAD+FAZ} , w czasie 1 godz. (MJ) | Ciepło ładowania Q _{LAD} , w czasie 1 godz. (MJ) | | |
| Nasłonecznienie R (Wh·m ⁻²) | 0,794 (p=0,000) | 0,214 (p=0,015) | | |
| Średnia temperatura powietrza zasysanego znad kurtyny termoizolacyjnej T_{zas} (°C) | 0,865 (p=0,000) | 0,306 (p=0,000) | | |
| Średnia temperatura powietrza wewnątrz tunelu T_{rosl} (°C) | 0,770 (p=0,000) | 0,131 (p=0,140) | | |
| Średnia temperatura otoczenia T_{zew} (°C) | 0,313 (p=0,000) | -0,0717 (p=0,421) | | |
| Średnia temperatura złoża przed rozpo- częciem cyklu ładowania $T_{zloża}$ (°C) | -0,0554 (p=0,534) | -0,0869 (p=0,329) | | |
| Różnica średnich temperatur zasysanego powietrza T_{zas} i temperatur złoża przed rozpoczęciem cyklu ładowania $T_{zloża}$; $\Delta T_{zas-zloża}$ (°C) | 0,909 (p=0,000) | 0,351 (p=0,000) | | |
| Strumień zatłaczanego powietrza q_{pow} (m ³ ·s ⁻¹) | -0,0564 (p=0,527) | 0,291 (p=0,001) | | |

Zakresy pomiarowe analizowanych zmiennych: R=3,7÷859,6 Wh·m⁻²; T_{zas} =19,4÷37,2°C; T_{rosf} =18,6÷30,8°C; T_{zew} =9,3÷26,5°C; $T_{zloža}$ =16,6÷22,7°C; $\Delta T_{zas-zloža}$ =1,2÷18,1°C; q_{pow} =0,18÷0,20 m³·s⁻¹ Liczba ważnych obserwacji N=128

Dla określenia łącznego wpływu różnych czynników przeprowadzono analizę regresji wielorakiej uwzględniającej zmienne niezależne wymienione w Tabeli 2. Analiza wykazała, że spośród siedmiu uwzględnionych zmiennych niezależnych dwie uzyskały istotnie wyso-

kie wartości statystyki t-Studenta (Tab. 3). Otrzymana regresja wieloraka cechowała się poprawionym współczynnikiem determinacji $R^2=83,3\%$. Analogiczna regresja wieloraka opracowana dla niekorygowanego ciepła ładowania Q_{LAD} , czyli bilansu entalpii akumulatora Q_{AK} , cechowała się znacznie mniejszym poprawionym współczynnikiem determinacji $R^2=29,4\%$.

Tabela 3.

Wyniki analizy regresji wielorakiej określającej zależność skorygowanego ciepła ładowania $Q_{LAD+FAZ}$ (MJ) w ciągu 1-godzinnych okresów ładowania od analizowanych zmiennych dla zakresu strumienia powietrza $0,18\div0,20$ m³·s⁻¹

| Wyszczególnienie | Współczynnik regresji b | Błąd standardowy współczynnika regresji b | Wartość statystyki t | Istotność wartości statystyki t |
|---|----------------------------|---|----------------------------|---------------------------------------|
| Wyraz wolny | -0,53 | 1,55 | -0,343 | 0,732 |
| Różnica średnich temperatur zasysa- nego powietrza T_{zas} i temperatur złoża przed rozpoczęciem cyklu ładowania $T_{zloża}$; $\Delta T_{zas-zloża}$ (°C) | 0,657 | 0,080 | 8,18 | 0,000000 |
| Średnia temperatura zasysanego po- wietrza T_{zas} (°C) | 0,220 | 0,0786 | 2,79 | 0,00606 |

Metoda: krokowa postępująca, R²=83,3%; N=128; F(2,125)=317,76 p<0,0000

Temperatura zasysanego powietrza uzyskała niższą wartość statystyki t-Studenta, więc ponowiono analizę regresji wielorakiej bez udziału tej zmiennej. Uzyskany poprawiony współczynnik determinacji R² był tylko nieznacznie mniejszy i wynosił 82,4%. Równanie określające zależność ilości ciepła gromadzonego w złożu akumulatora $Q_{LAD+FAZ}$ (MJ) od badanych zmiennych przybrało więc postać:

$$Q_{LAD+FAZ} = 3,69 + 0,860 \cdot \Delta T_{zas-zloża}$$
(25)

gdzie:

 $\Delta T_{zas-zloża}$ – różnica średnich temperatur zasysanego powietrza i temperatur złoża przed rozpoczęciem cyklu ładowania w zakresie 1,2÷18,1°C.

Graficzna reprezentacja równania 25 została przedstawiona na rysunku 25.



Rys. 25. Zależność ilości ciepła gromadzonego w złożu akumulatora skorygowanego o bilans przemian fazowych wody $Q_{LAD+FAZ}$, od różnicy średnich temperatur zasysanego powietrza i temperatur złoża przed rozpoczęciem cyklu ładowania $\Delta T_{zas-złoża}$, przy wykorzystaniu wszystkich sekcji akumulatora

6.2.2. Czynniki wpływające na ilość ciepła odzyskiwanego z akumulatora

Podczas rozładowywania akumulatora ciepła i dogrzewania uprawianych roślin prędkość obrotowa wentylatora zatłaczającego powietrze do akumulatora została ustawiona na 1800 obr·min⁻¹, jednak poszczególne sekcje złoża pracowały zgodnie z algorytmem przedstawionym na rysunku 14, tj. przepływ powietrza przez sekcje był wyłącznie równoległy. Dodatkowo, podczas dogrzewania roślin strumień ciepłego powietrza wypływający z akumulatora był zawsze kierowany do perforowanych rękawów foliowych umieszczonych pod rynnami uprawowymi (Rys. 8), w odróżnieniu od cykli ładowania akumulatora, gdy strumień powietrza był kierowany pod rynny uprawowe lub na zewnątrz tunelu. Przy takiej samej prędkości obrotowej wentylatora kierowanie przepływu powietrza przez sekcje szeregowo lub równolegle wpływa na strumień powietrza analogicznie do zjawiska przepływu prądu elektrycznego przez szeregowy lub równoległy układ rezystorów. Zgodnie z prawami Kirchoffa opór jaki strumień powietrza napotyka podczas przepływu równolegle przez dwie sekcje złoża jest znacznie mniejszy niż gdy przepływa przez jedną sekcję. Różnica ta jest jeszcze większa, gdy przepływ równoległy przez trzy sekcje zostanie porównany do przepływu szeregowego przez te sekcje. W efekcie, przy takiej samej prędkości obrotowej wentylatora strumień powietrza zatłaczanego do akumulatora ciepła będzie znacznie się różnił. Jest to odzwierciedlone w histogramie wielkości strumienia powietrza uzyskanych podczas rozładowywania akumulatora (Rys. 26), który różni się znacznie od histogramu wielkości strumieni powietrza uzyskanych podczas ładowania akumulatora (Rys. 19), zarówno jeżeli chodzi o zakres uzyskanych wartości jak i o wielkości najczęściej spotykane. Podczas ładowania akumulatora ponad 37% uzyskanych wielkości strumienia powietrza należało do przedziału (0,18 m³·s⁻¹; 0,2 m³·s⁻¹), natomiast podczas rozładowywania akumulatora ponad 71% uzyskanych wielkości strumienia należało do przedziału (0,21 m³·s⁻¹; 0,23 m³·s⁻¹). Różnica w wielkościach strumienia wynikała z dłuższych rur służących do zasysania powietrza podczas ładowania akumulatora, niż rur do zasysania powietrza podczas rozładowywania. W związku z tym, że najczęściej uzyskiwane wartości strumienia powietrza należały do przedziału (0,21 m³·s⁻¹; 0,23 m³·s⁻¹) to analizy związane z procesem rozładowywania przeprowadzono dla tego zawężonego przedziału.



Rys. 26. Rozkład wielkości strumienia powietrza podczas rozładowywania akumulatora w okresie od 9 kwietnia do 30 maja 2013 roku

Rozładowywanie akumulatora ciepła jest przeprowadzane gdy uprawiane rośliny wymagają dogrzewania. Ma to miejsce najczęściej w nocy, ale często również w chłodne dni. W nowoczesnych systemach uprawy po osłonami ograniczanie strat ciepła i spowolnienie spadku temperatury uprawianych roślin jest wykonywane poprzez zamykanie wywietrzników oraz zaciągnięcie kurtyn termoizolacyjnych. Wymienione środki zapobiegawcze są często niewystarczające i systemy upraw pod osłonami przewidują możliwość zamontowania dodatkowych źródeł ciepła, z których najpopularniejsze to systemy rozprowadzające ciepłe powietrze lub ciepłą wodę. Ilość ciepła zależy od objętości powietrza, którą trzeba ogrzać razem z dogrzewanymi roślinami. Dlatego kurtyny termoizolacyjne są zamontowane jak najbliżej uprawianych roślin. Z tego powodu obieg powietrza podczas dogrzewania roślin z wykorzystaniem akumulatora ciepła zakłada zasysanie powietrza nie z najwyższej części tunelu, jak ma miejsce podczas ładowania akumulatora, tylko spośród roślin (Rys. 8). W tym układzie ilość ciepła odzyskiwaną z akumulatora ciepła podczas jego rozładowywania zależy rozpatrywać w odniesieniu do temperatury zasysanego powietrza, które jest tożsame z temperaturą powietrza pomiędzy roślinami $T_{rośl}$, temperatury otoczenia T_{zew} , temperatura złoża $T_{zloża}$ i strumienia zatłaczanego powietrza q_{pow} .

Podczas cyklów rozładowywania akumulatora zaobserwowano, podobnie jak przy jego ładowaniu, zachodzenie zjawisk skraplania pary wodnej z przepływającego powietrza do złoża oraz odparowywania wody znajdującej się w złożu. Jednak, odwrotnie niż przy ładowaniu, podczas rozładowywania akumulatora zjawiskiem dominującym było parowanie wody ze złoża, a skraplanie zaobserwowano tylko w części spośród analizowanych dekad (Rys. 27). Średnia masa pary wodnej ulegającej skropleniu w ciągu jednej godziny wynosiła od 0 do 405 g, co odpowiadało ilości ciepła od 0 do 54 kJ, natomiast średnia masa wody ulegającej odparowaniu w ciągu jednej godziny wynosiła od 1076 do 1762 g, co odpowiadało zwiększeniu ilości ciepła ujętej bilansem entalpii Q_{AK} o wartości od 2469 do 4299 kJ.



Rys. 27. Masa wody parującej ze złoża akumulatora (wartości ujemne) i skraplającej się w złożu (wartości dodatnie) podczas rozładowywania akumulatora w kolejnych dekadach sezonu 2013 roku, przy wykorzystaniu wszystkich sekcji akumulatora

Ilość ciepła oddawana do złoża lub strumienia przepływającego powietrza podczas skraplania pary wodnej w złożu zmieniała się w ciągu cykli rozładowywania (Rys. 28). Jednak zmiany te nie były istotne statystycznie.



Rys. 28. Ilość ciepła oddawanego podczas schładzania i skraplania pary wodnej w kolejnych godzinach cyklów rozładowywania średnio dla okresu od 9 kwietnia do 30 maja 2013 roku, przy wykorzystaniu wszystkich sekcji akumulatora. Średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie (ANOVA, test Duncana, $p \le 0,05$)

Zjawisko parowania było obserwowane znacznie częściej i występowało we wszystkich godzinnych okresach rozładowywania akumulatora (Rys. 29). Już w pierwszej godzinie rozładowywania ilość ciepła pobrana z akumulatora, lub strumienia przepływającego powietrza, wyniosła średnio 2593 kJ. W kolejnych godzinach ilość pobranego ciepła stopniowo wzrastała aż do 4537 kJ w siódmej godzinie, po czym malała obniżając się do wartości 3158 kJ w dziesiątej godzinie.



Rys. 29. Ilość ciepła pobieranego podczas ogrzewania i parowania wody ze złoża akumulatora w kolejnych godzinach cyklów rozładowywania średnio dla okresu od 9 kwietnia do 30 maja 2013 roku, przy wykorzystaniu wszystkich sekcji akumulatora. Średnie oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie (ANOVA, test Duncana, $p \le 0,05$)

Bilans entalpii powietrza wchodzącego do i wychodzącego z akumulatora Q_{AK} , liczony dla 1-godzinnych okresów rozładowywania, był zależny od średniej temperatury powietrza pomiędzy roślinami, lecz współczynnik korelacji Pearsona był niewielki i wyniósł r = 0,439 (Rys. 30). Natomiast uwzględnienie w bilansie ciepła pobieranego lub oddawanego podczas przemian fazowych wody w złożu (Rys. 31) zwiększyło współczynnik korelacji do wartości r = 0,623.



Rys. 30. Wpływ średniej temperatury powietrza zasysanego z wnętrza tunelu na bilans entalpii wejścia do i wyjścia z akumulatora dla 1-godzinnych okresów rozładowywania i przedziału strumieni powietrza (0,21 m³·s⁻¹; 0,23 m³·s⁻¹), przy wykorzystaniu wszystkich sekcji akumulatora



Rys. 31. Wpływ średniej temperatury powietrza zasysanego spomiędzy roślin na ciepło rozładowywania akumulatora skorygowane o bilans przemian fazowych wody parującej ze złoża lub w nim skraplanej, dla 1-godzinnych okresów rozładowywania i przedziału strumieni powietrza (0,21 m³·s⁻¹; 0,23 m³·s⁻¹), przy wykorzystaniu wszystkich sekcji akumulatora

Analiza współzależności mierzonych i obliczanych zmiennych (Tab. 4) wykazała, że wysokie współczynniki korelacji cechowały wpływ temperatury otoczenia T_{zew} i temperatury powietrza wewnątrz tunelu $T_{rośl}$ na ciepło rozładowywania akumulatora skorygowane o bilans przemian fazowych wody $Q_{ROZLAD+FAZ}$. Niższy współczynnik korelacji, ale również bardzo istotny, cechował wpływ strumienia zatłaczanego powietrza q_{pow} na skorygowane ciepło rozładowywania. Wysoki współczynnik korelacji uzyskano natomiast dla zmiennej obliczonej jako różnica średnich temperatur zasysanego powietrza i temperatur złoża przed rozpoczęciem cyklu ładowania $\Delta T_{rośl-zloża}$, pomimo, że sama temperatura złoża przed rozpoczęciem cyklu ładowania $T_{zloża}$ nie cechowała się istotną współzależnością.

Tabela 4.

Współczynniki korelacji pomiędzy ciepłem rozładowywania. obliczanym dwoma metodami, a wybranymi zmiennymi pomiarowymi wyznaczone dla 1-godzinnych okresów rozładowywania akumulatora i zakresu strumieni powietrza $0,21\div0,23$ m³·s⁻¹

| | Współczynniki korelacji r Pearsona oraz poziomy ich istotności p | | | |
|---|--|---|--|--|
| Zmienna niezależna | Ciepło rozładowywania skorygowane o bilans przemian fazowych wody Q _{ROZLAD+FAZ} , w czasie 1 godz. (MJ) | Ciepło rozładowywania Q _{ROZŁAD} , w czasie 1 godz. (MJ) | | |
| Średnia temperatura otoczenia T_{zew} (°C) | -0,691 (p=0,000) | -0,571 (p=0,000) | | |
| Średnia temperatura powietrza zasysanego spomiędzy roślin T_{zas} (= $T_{rośl}$) (°C) | -0,663 (p=0,000) | -0,439 (p=0,000) | | |
| Strumień zatłaczanego powietrza q_{pow} (m ³ ·s ⁻¹) | 0,127 (p=0,000) | -0,057 (p=0,335) | | |
| Średnia temperatura złoża przed rozpo- częciem cyklu ładowania $T_{zloża}$ (°C) | 0,0982 (p=0,096) | 0,203 (p=0,001) | | |
| Różnica średnich temperatur powietrza zasysanego spomiędzy roślin T_{zas} i tempe- ratur złoża przed rozpoczęciem cyklu roz- ładowywania $T_{zloża}$; $\Delta T_{zas-zloża}$ (°C) | -0,863 (p=0,000) | -0,743 (p=0,000) | | |

Zakresy pomiarowe analizowanych zmiennych: $T_{zew}=2,9\div18,2^{\circ}\text{C}$; $T_{zas}=T_{rost}=7,9\div18,9^{\circ}\text{C}$; $q_{pow}=0,210\div0,230 \text{ m}^{3}\cdot\text{s}^{-1}$; $T_{zloża}=17,0\div23,2^{\circ}\text{C}$; $\Delta T_{zas-zloża}=-11,5\div-2,2^{\circ}\text{C}$ Liczba ważnych obserwacji N=289.

Dla określenia łącznego wpływu różnych czynników przeprowadzono analizę regresji wielorakiej uwzględniającej zmienne niezależne wymienione w Tabeli 4. Analiza wykazała, że spośród pięciu uwzględnionych zmiennych niezależnych dwie uzyskały istotnie wysokie

wartości statystyki t-Studenta (Tab. 5). Otrzymana regresja wieloraka cechowała się poprawionym współczynnikiem determinacji $R^2=78,1\%$. Analogiczna regresja wieloraka opracowana dla niekorygowanego ciepła rozładowywania Q_{ROZLAD} cechowała się znacznie mniejszym poprawionym współczynnikiem determinacji $R^2=55,1\%$.

Tabela 5.

Wyniki analizy regresji wielorakiej określającej zależność skorygowanego ciepła rozładowywania $Q_{ROZLAD+FAZ}$ (MJ) w ciągu 1-godzinnych okresów rozładowywania od analizowanych zmiennych zakresu strumieni powietrza $0,21\div0,23$ m³·s⁻¹

| Wyszczególnienie | Współczynnik regresji b | Błąd standardowy współczynnika regresji b | Wartość statystyki t | Istotność wartości statystyki t |
|--|----------------------------|---|-------------------------|---------------------------------------|
| Wyraz wolny | -10,4 | 1,61 | -6,46 | 0,000000 |
| Różnica średnich temperatur powietrza zasysanego T_{zas} i tempera- tur złoża przed rozpoczęciem cyklu rozładowywania $T_{zloża}$; $\Delta T_{zas-zloża}$ (°C) | -0,741 | 0,0234 | -31,7 | 0,000000 |
| Strumień zatłaczanego powietrza q_{pow} (m ³ ·s ⁻¹) | 50,7 | 7,24 | 7,01 | 0,000000 |

Metoda: krokowa postępująca; R²=78,1%; N=289; F(2,286)=513,04 p<0,0000

Ponieważ strumień zatłaczanego powietrza uzyskał niższą wartość statystyki t-Studenta ponowiono analizę regresji wielorakiej bez udziału tej zmiennej. Uzyskany poprawiony współczynnik determinacji R² był niewiele niższy i wynosił 74,4%. Równanie określające zależność ilości ciepła odbieranego ze złoża akumulatora $Q_{ROZLAD+FAZ}$ (MJ) od badanych zmiennych przybrało więc postać:

$$Q_{ROZLAD+FAZ} = 0,841 - 0,729 \cdot \Delta T_{zas-zloža}$$
(26)

gdzie:

 $\Delta T_{zas-zloża}$ – różnica średnich temperatur wewnątrz tunelu i temperatur złoża przed rozpoczęciem cyklu rozładowywania w zakresie -11,5÷-2,2°C

Graficzna reprezentacja równania 26 została przedstawiona na rysunku 32.



Rys. 32. Zależność ilości ciepła odbieranego ze złoża akumulatora skorygowanego o bilans przemian fazowych wody $Q_{ROZLAD+FAZ}$, od różnicy średnich temperatur powietrza wewnątrz tunelu i temperatur złoża przed rozpoczęciem cyklu rozładowywania $\Delta T_{zas-złoża}$, przy wykorzystaniu wszystkich sekcji akumulatora

6.3. Wpływ strumienia zatłaczanego powietrza oraz objętości złoża na ilość ciepła gromadzonego w akumulatorze oraz z niego odzyskiwanego

Ocenę wpływu wielkości strumienia powietrza oraz wielkości złoża akumulatora na ilość ciepła gromadzonego podczas ładowania i odzyskiwanego podczas rozładowywania przeprowadzono w okresie od 17 maja do 7 sierpnia 2013 roku. W tunelu nad akumulatorem uprawiano rośliny ogórka. W badaniu wykorzystano pojedyncze sekcje akumulatora nr 1 i 3, o objętości tłucznia porfirowego 12,7 i 26,1 m³. Dla sekcji 12,7 m³ średnia wielkość strumienia powietrza podczas ładowania wynosiła 0,0805 m³·s⁻¹, a zakres wynosił od 0,029 m³·s⁻¹ do 0,150 m³·s⁻¹ (Rys. 33), natomiast podczas rozładowywania akumulatora średnia wielkość strumienia powietrza wynosiła 0,0932 m³·s⁻¹, a zakres wynosił od 0,030 m³·s⁻¹ do 0,158 m³·s⁻¹. Dla sekcji o powierzchni złoża 26,1 m³ średnie wielkości strumienia powietrza wynosiła dowania i 0,232 m³·s⁻¹ podczas rozładowywania, a zakresy wynosiły 0,219 m³·s⁻¹ podczas ładowania i 0,232 m³·s⁻¹.



Rys. 33. Rozkład wielkości strumienia powietrza podczas ładowania akumulatora w okresie od 17 maja 2013 do 7 sierpnia 2013 roku z podziałem na wielkość używanych sekcji akumulatora ciepła

Oprócz badania wpływu strumienia powietrza oraz wielkości złoża akumulatora na ilość ciepła gromadzonego podczas ładowania i odzyskiwanego podczas rozładowywania, do przeprowadzonych analiz włączono te same parametry środowiskowe i stanu akumulatora, które zostały użyte w poprzednim rozdziale. Przeprowadzenie oceny wpływu wielkości złoża akumulatora na ciepło ładowania i rozładowywania akumulatora w sposób porównywalny do oceny wpływu pozostałych parametrów wymagało jednak przyjęcia założenia, że wielkość złoża akumulatora, czyli objętość kruszywa, jest zmienną ciągłą, a nie dyskretną, pomimo, że znane są tylko dwie wartości tej zmiennej.

W tabeli 6 przedstawiono wyniki analizy współzależności pomiędzy mierzonymi wartościami parametrów środowiskowych, lub związanych ze stanem akumulatora, a obliczonymi wartościami ciepła ładowania akumulatora w wersji uwzględniającej, lub nie uwzględniającej, ciepło przemian fazowych wody. W przypadku ciepła ładowania skorygowanego o bilans przemian fazowych wody Q_{LAD+FAZ} wszystkie uzyskane współczynniki korelacji były istotne statystycznie. W przypadku gdy analizowano zmienne w odniesieniu do ciepła ładowania Q_{LAD}, bez uwzględniania ciepła przemian fazowych wody, wpływ temperatury zasysanego powietrza T_{zas} nie był istotny. Niezależnie od sposobu obliczania ciepła ładowania, korelacje pomiędzy ciepłem ładowania a temperaturą powietrza wewnątrz tunelu T_{rośl} i temperaturą otoczenia T_{zew} przybrały wartości ujemne, co było obserwacją zaskakującą.

Tabela 6.

Współczynniki korelacji pomiędzy ciepłem ładowania, obliczanym dwoma metodami, a wybranymi zmiennymi pomiarowymi wyznaczone dla 1-godzinnych okresów ładowania sekcji akumulatora o objętości 12,7÷26,1 m³ i zakresu strumieni powietrza 0,028÷0,306 m³·s⁻¹

| | Współczynniki korelacji <i>r</i> Pearsona oraz poziomy ich istotności <i>p</i> | | | |
|---|--|--|--|--|
| Zmienna niezależna | Ciepło ładowania skorygowane o bilans przemian fazowych wody Q _{LAD+FAZ} , w czasie 1 godz. (MJ) | Ciepło ładowania Q _{LAD} , w czasie 1 godz. (MJ) | | |
| Objętość kruszywa w złożu Vzłoża (m ³) | 0,623 (p=0,000) | 0,586 (p=0,000) | | |
| Nasłonecznienie R (Wh·m ⁻²) | 0,426 (p=0,000) | 0,157 (p=0,000) | | |
| Średnia temperatura powietrza zasysanego znad kurtyny termoizolacyjnej T_{zas} (°C) | 0,233 (p=0,000) | -0,053 (p=0,191) | | |
| Średnia temperatura powietrza wewnątrz tunelu <i>Trośl</i> (°C) | -0,201 (p=0,000) | -0,341 (p=0,000) | | |
| Średnia temperatura otoczenia Tzew (°C) | -0,358 (p=0,000) | -0,569 (p=0,000) | | |
| Średnia temperatura złoża przed rozpo- częciem cyklu ładowania <i>T_{zloża}</i> (°C) | -0,570 (p=0,000) | -0,632 (p=0,000) | | |
| Różnica średnich temperatur zasysanego powietrza T_{zas} i temperatur złoża przed rozpoczęciem cyklu ładowania $T_{zloża}$; $\Delta T_{zas-zloża}$ (°C) | 0,440 (p=0,000) | 0,166 (p=0,000) | | |
| Strumień zatłaczanego powietrza <i>q</i> _{pow} (m ³ ·s ⁻¹) | 0,787 (p=0,000) | 0,696 (p=0,000) | | |

Zakresy pomiarowe analizowanych zmiennych: $V_{zloża}=12,7\div26,1$ m³; $R=39,3\div901,6$ Wh·m⁻²; $T_{zas}=23,2\div50,2^{\circ}$ C; $T_{rosf}=19,8\div35,2^{\circ}$ C; $T_{zew}=10,3\div36,4^{\circ}$ C; $T_{zloża}=18,1\div26,0^{\circ}$ C; $\Delta T_{zas-zloża}=3,9\div26,8^{\circ}$ C; $q_{pow}=0,028\div0,306$ m³·s⁻¹

Liczba ważnych obserwacji N=619

Dla określenia łącznego wpływu czynników środowiskowych i stanu akumulatora przeprowadzono analizę regresji wielorakiej uwzględniającej zmienne niezależne wymienione w Tabeli 6. Analiza wykazała, że spośród ośmiu uwzględnionych zmiennych niezależnych sześć uzyskało istotnie wysokie wartości statystyki t-Studenta (Tab. 7). Otrzymana regresja wieloraka cechowała się poprawionym współczynnikiem determinacji R²=89,5%. Analogiczna regresja wieloraka opracowana dla niekorygowanego ciepła ładowania Q_{LAD} (czyli bilansu entalpii akumulatora Q_{AK}) cechowała się znacznie mniejszym poprawionym współczynnikiem determinacji R²=68,9%. Analiza regresji wielorakiej wykazała również, że temperatura powietrza wewnątrz tunelu T_{zas} i temperatura otoczenia T_{zew}, czyli dwie zmienne, których ujemne wartości współczynnika korelacji (Tab. 6) były zaskakujące, są albo nieistotne albo relatywnie mało istotne dla modelu regresji. Tabela 7.

Wyniki analizy regresji wielorakiej określającej zależność skorygowanego ciepła ładowania $Q_{LAD+FAZ}$ (MJ) w ciągu 1-godzinnych okresów ładowania od analizowanych zmiennych, dla sekcji akumulatora o objętości 12,7÷26,1 m³ i zakresu strumieni powietrza 0,028÷0,306 m³·s⁻¹

| Wyszczególnienie | Współczynnik regresji b | Błąd standardowy współczynnika regresji b | Wartość statystyki t | Istotność wartości statystyki t |
|---|----------------------------|---|-------------------------|---------------------------------------|
| Wyraz wolny | 9,09 | 1,79 | 5,09 | 0,000000 |
| Strumień zatłaczanego powietrza q_{pow} (m ³ ·s ⁻¹) | 57,1 | 1,93 | 29,5 | 0,000000 |
| Różnica średnich temperatur zasysa- nego powietrza T_{zas} i temperatur złoża przed rozpoczęciem cyklu ładowania $T_{zloża}$; $\Delta T_{zas-zloża}$ (°C) | 0,569 | 0,0281 | 20,3 | 0,000000 |
| Średnia temperatura otoczenia T_{zew} (°C) | -0,138 | 0,0224 | -6,14 | 0,000000 |
| Nasłonecznienie R (Wh·m ⁻²) | 0,0041 | 0,000629 | 6,51 | 0,000000 |
| Średnia temperatura złoża przed roz- poczęciem cyklu ładowania $T_{zloża}$ (°C) | -0,558 | 0,0739 | -7,55 | 0,000000 |
| Objętość kruszywa w złożu V _{złoża} (m ³) | -0,127 | 0,0226 | -5,64 | 0,000000 |

Metoda: krokowa postępująca; R²=89,5%; N=611; F(6,604)=866,15 p<0,0000

Nasłonecznienie, temperatura otoczenia, temperatura złoża przed rozpoczęciem cyklu ładowania oraz objętość kruszywa uzyskały najniższe wartości statystyki t-Studenta. W związku z tym ponowiono analizę regresji wielorakiej pozostawiając z tych zmiennych tylko objętość kruszywa. Uzyskany poprawiony współczynnik determinacji R² był nieznacznie mniejszy i wynosił 87,1%. Równanie określające zależność ilości ciepła gromadzonego w złożu akumulatora Q_{LAD+FAZ} (MJ) od badanych zmiennych ostatecznie przyjęło postać:

$$Q_{LAD+FAZ} = -7,32 + 66,4 \cdot q_{pow} + 0,675 \cdot \Delta T_{zas-zloża} - 0,115 \cdot V_{zloża}$$
(27)

gdzie:

 q_{pow} – strumień zatłaczanego powietrza w zakresie 0,028÷0,306 m³·s⁻¹

 $\Delta T_{zas-zloża}$ – różnica średnich temperatur zasysanego powietrza i temperatur złoża przed rozpoczęciem cyklu ładowania w zakresie 3,9÷26,8°C

Vzloża – objętość kruszywa w złożu w zakresie 12,7÷26,1 m³

Analogicznie jak dla procesu ładowania, analiza współzależności mierzonych i obliczanych zmiennych na ciepło rozładowywania skorygowane o bilans przemian fazowych wody Q_{ROZŁAD+FAZ} (Tab. 8) wykazała, że istotne współczynniki korelacji cechowały wpływ wszystkich analizowanych zmiennych. W przypadku gdy analizowano badane zmienne w odniesieniu do ciepła rozładowywania Q_{ROZŁAD} obliczanego jako bilans entalpii powietrza na wejściu do i wyjściu z akumulatora, wpływ różnicy średnich temperatur wewnątrz tunelu (powietrza zasysanego spomiędzy roślin) i temperatur złoża przed rozpoczęciem cyklu rozładowywania $\Delta T_{zas-złoża}$ nie był istotny.

Tabela 8.

Współczynniki korelacji pomiędzy ciepłem rozładowywania, obliczanym dwoma metodami, a wybranymi zmiennymi pomiarowymi wyznaczone dla 1-godzinnych okresów rozładowywania sekcji akumulatora o objętości 12,7÷26,1 m³ i zakresu strumieni powietrza $0,03\div0,305$ m³·s⁻¹

| | Współczynniki korelacji <i>r</i> Pearsona oraz poziomy ich istotności <i>p</i> | | | |
|--|--|---|--|--|
| Zmienna niezależna | Ciepło rozładowywania skorygowane o bilans przemian fazowych wody Q _{ROZŁAD+FAZ} , w czasie 1 godz. (MJ) | Ciepło rozładowywania <i>Q_{ROZLAD}</i> , w czasie 1 godz. (MJ) | | |
| Objętość kruszywa w złożu Vzłoża (m ³) | 0,696 (p=0,000) | 0,718 (p=0,000) | | |
| Średnia temperatura otoczenia Tzew (°C) | -0,536 (p=0,000) | -0,475 (p=0,000) | | |
| Średnia temperatura powietrza zasysanego spomiędzy roślin T_{zas} (= T_{rosl}) (°C) | -0,307 (p=0,000) | -0,259 (p=0,000) | | |
| Strumień zatłaczanego powietrza <i>q_{pow}</i> (m ³ ·s ⁻¹) | 0,865 (p=0,000) | 0,888 (p=0,002) | | |
| Średnia temperatura złoża przed rozpo- częciem cyklu rozładowywania $T_{zloża}$ (°C) | -0,285 (p=0,000) | -0,381 (p=0,000) | | |
| Różnica średnich temperatur powietrza zasysanego T_{zas} i temperatur złoża przed rozpoczęciem cyklu rozładowywania $T_{zloża}$; $\Delta T_{zas-zloża}$ (°C) | -0,125 (p=0,003) | 0,0033 (p=0,938) | | |

Zakresy pomiarowe analizowanych zmiennych: $V_{zloža}=12,7\div26,1$ m³; $T_{zew}=6,6\div31,5^{\circ}$ C; $T_{zas}=T_{ro\delta i}=12,6\div37,8^{\circ}$ C; $q_{pow}=0,03\div0,305$ m³·s⁻¹; $T_{zloža}=18,4\div26,5^{\circ}$ C; $\Delta T_{zas-zloža}=-8,6\div15,2^{\circ}$ C Liczba ważnych obserwacji N=545

Dla określenia łącznego wpływu czynników środowiskowych i stanu akumulatora przeprowadzono analizę regresji wielorakiej krokowej postępującej uwzględniającej zmienne niezależne wymienione w Tabeli 8. Analiza wykazała, że spośród ośmiu uwzględnionych zmiennych niezależnych cztery uzyskały istotnie wysokie wartości statystyki t-Studenta (Tab. 9). Otrzymana regresja wieloraka cechowała się poprawionym współczynnikiem determinacji R²=84,3%. Analogiczna regresja wieloraka opracowana dla niekorygowanego ciepła rozładowywania Q_{ROZŁAD} cechowała się nieznacznie mniejszym poprawionym współczynnikiem determinacji R²=81,8%.

Tabela 9.

Wyniki analizy regresji wielorakiej określającej zależność skorygowanego ciepła rozładowywania $Q_{ROZŁAD+FAZ}$ (MJ) w ciągu 1-godzinnych okresów rozładowywania od analizowanych zmiennych. dla sekcji akumulatora o objętości 12,7÷26,1 m³ i zakresu strumieni powietrza 0.03÷0.306 m³·s⁻¹

| | Współczynnik regresji b | Błąd standardowy współczynnika re- gresji b | Wartość statystyki t | Istotność wartości statystyki t |
|--|----------------------------|---|----------------------------|---------------------------------------|
| Wyraz wolny | -16,1 | 1,09 | -14,8 | 0,000000 |
| Strumień zatłaczanego powietrza q_{pow} (m ³ ·s ⁻¹) | 29,1 | 1,15 | 25,4 | 0,000000 |
| Średnia temperatura złoża przed rozpoczęciem cyklu rozładowywania $T_{zloża}$ (°C) | 0,761 | 0,0475 | 16,0 | 0,000000 |
| Średnia temperatura otoczenia T_{zew} (°C) | -0,179 | 0,0372 | -4,81 | 0,000002 |
| Objętość kruszywa w złożu V _{złoża} (m ³) | 0,0427 | 0,0126 | 3,40 | 0,000724 |
| Średnia temperatura powietrza zasy- sanego spomiędzy roślin T_{zas} (= $T_{rośl}$) (°C) | 0,0671 | 0,0533 | 1,26 | 0,208475 |

Metoda: krokowa postępująca; R²=84,3%; N=545; F(5,539)=585,68 p<0,0000

Temperatura otoczenia, objętość kruszywa oraz temperatura powietrza wewnątrz tunelu uzyskały najniższe wartości statystyki t-Studenta. Z tego powodu ponowiono analizę regresji wielorakiej pozostawiając z tych zmiennych tylko objętość kruszywa. Uzyskany poprawiony współczynnik determinacji R² był nieznacznie mniejszy i wynosił 82,8%. Równanie określające zależność ilości ciepła odbieranego ze złoża akumulatora $Q_{ROZLAD+FAZ}$ (MJ) od badanych zmiennych przyjęło postać:

$$Q_{ROZLAD+FAZ} = -16.8 + 32.3 \cdot q_{pow} + 0.718 \cdot T_{zloża} + 0.0322 \cdot V_{zloża}$$
(28)

gdzie:

 q_{pow} – strumień zatłaczanego powietrza w zakresie 0,03÷0,305 m³·s⁻¹

 $T_{zloża}$ – średnia temperatura złoża przed rozpoczęciem cyklu rozładowywania w zakresie 18,4÷26,5°C

$$V_{zloża}$$
 – objętość kruszywa w złożu w zakresie 12,7÷26,1 m³

Niskie wartości statystyki t-Studenta podczas analizy regresji wielorakiej dla wpływu objętości kruszywa zarówno na ilość ciepła gromadzonego w złożu akumulatora uzyskane dla okresów ładowania (Tab. 7) jak i na ilość ciepła odbieranego ze złoża akumulatora dla okresów rozładowywania (Tab. 9) zdecydowały o powtórzeniu powyższych analiz dla zbioru danych rozszerzonego o pomiary wykonane podczas pracy całego akumulatora (tj. szerokiej sekcji i dwóch wąskich sekcji razem). Pomiary wykonywano w okresie 7.08-27.08.2013 roku. Łączne pole powierzchni wszystkich sekcji akumulatora wynosiło 75,9 m², a całkowita objętość tłucznia porfirowego 51,52 m³. Średni strumień powietrza podczas ładowania wynosił 0,232 m³·s⁻¹, a jego zakres wynosił 0,218÷0,238 m³·s⁻¹ (Rys. 34). Z kolei podczas rozładowywania średni strumień powietrza wynosił 0,253 m³·s⁻¹, a jego zakres wynosił 0,242÷0,258 m³·s⁻¹. Relatywnie wąskie zakresy wartości strumienia powietrza dla tej wielkości złoża akumulatora wynikały z wykorzystania danych zbieranych podczas pracy akumulatora w trybie przyjętym jako najbardziej odpowiedni dla uprawy roślin w tunelu.



Rys. 34. Rozkład wielkości strumienia powietrza podczas ładowania akumulatora w okresie od 17 maja 2013 do 27 sierpnia 2013 roku z podziałem na wielkość używanych sekcji akumulatora ciepła

W przeprowadzonych analizach włączono te same parametry środowiskowe oraz związane ze stanem akumulatora, które były przedmiotem poprzedniej analizy. Analiza współzależności mierzonych i obliczanych zmiennych (Tab. 10) wykazała taki sam istotny wpływ wszystkich analizowanych zmiennych na ciepło ładowania skorygowane o bilans przemian fazowych wody Q_{LAD+FAZ}. Ponownie stwierdzono również brak istotnej współzależności pomiędzy temperaturą zasysanego powietrza a ciepłem ładowania Q_{LAD} obliczanym tylko jako bilans entalpii powietrza na wejściu do i wyjściu z akumulatora. Również korelacje pomiędzy temperaturą powietrza wewnątrz tunelu T_{zas} i temperaturą otoczenia T_{zew} a ciepłem ładowania obliczanym obiema metodami, ponownie przyjęły ujemne wartości.

Tabela 10.

Współczynniki korelacji pomiędzy ciepłem ładowania, obliczanym dwoma metodami, a wybranymi zmiennymi pomiarowymi wyznaczone dla 1-godzinnych okresów ładowania sekcji akumulatora o objętości 12,7 \div 51,5 m³ i zakresu strumieni powietrza 0,028 \div 0,306 m³·s⁻¹

| | Współczynniki korelacji r Pearsona oraz poziomy ich istotności n | | | |
|---|---|--|--|--|
| Zmienna niezależna | Ciepło ładowania skorygowane o bilans przemian fazowych | Ciepło ładowania Q _{LAD} , w czasie 1 godz. (MJ) | | |
| | wody Q _{LAD+FAZ} , w czasie 1 godz. (MJ) | | | |
| Objętość kruszywa w złożu Vzloża (m ³) | 0,611 (p=0,000) | 0,546 (p=0,000) | | |
| Nasłonecznienie R (Wh·m ⁻²) | 0,406 (p=0,000) | 0,179 (p=0,000) | | |
| Średnia temperatura powietrza zasysanego znad kurtyny termoizolacyjnej T_{zas} (°C) | 0,319 (p=0,000) | 0,0254 (p=0,485) | | |
| Średnia temperatura powietrza wewnątrz tunelu <i>Trośl</i> (°C) | -0,129 (p=0,000) | -0,271 (p=0,000) | | |
| Średnia temperatura otoczenia T_{zew} (°C) | -0,244 (p=0,000) | -0,472 (p=0,000) | | |
| Średnia temperatura złoża przed rozpo- częciem cyklu ładowania $T_{zloża}$ (°C) | -0,219 (p=0,000) | -0,291 (p=0,000) | | |
| Różnica średnich temperatur zasysanego powietrza T_{zas} i temperatur złoża przed rozpoczęciem cyklu ładowania $T_{zloża}$; $\Delta T_{zas-zloża}$ (°C) | 0,406 (p=0,000) | 0,135 (p=0,000) | | |
| Strumień zatłaczanego powietrza q_{pow} (m ³ ·s ⁻¹) | 0,781 (p=0,000) | 0,690 (p=0,000) | | |

Zakresy pomiarowe analizowanych zmiennych: $V_{zloža}=12,7\div51,5$ m³; $R=38,5\div901,6$ Wh·m⁻²; $T_{zas}=23,2\div50,2^{\circ}$ C; $T_{rosi}=19,8\div35,2^{\circ}$ C; $T_{zew}=10,3\div37,0^{\circ}$ C; $T_{zloža}=18,1\div26,0^{\circ}$ C; $\Delta T_{zas-zloža}=3,6\div26,8^{\circ}$ C; $q_{pow}=0,028\div0,306$ m³·s⁻¹

Liczba ważnych obserwacji N=762

Dla określenia łącznego wpływu czynników środowiskowych i stanu akumulatora przeprowadzono analizę regresji wielorakiej uwzględniającej zmienne niezależne wymienione w Tabeli 10. Analiza wykazała, że spośród ośmiu uwzględnionych zmiennych niezależnych sześć uzyskało istotnie wysokie wartości statystyki t-Studenta (Tab. 11). Zwiększenie zakresu analizowanych wartości zmiennej V_{złoża} spowodowało znaczący, ponad 2-krotny, wzrost statystyki t-Studenta dla tej zmiennej. Otrzymana regresja wieloraka cechowała się poprawionym współczynnikiem determinacji R^2 =88,8%. Analogiczna analiza regresji wielorakiej przeprowadzona dla niekorygowanego ciepła ładowania Q_{LAD}, czyli bilansu entalpii akumulatora Q_{AK}, cechowała się znacznie mniejszym poprawionym współczynnikiem determinacji R^2 =67,0%. Analiza regresji wielorakiej wykazała ponownie, że temperatura powietrza wewnątrz tunelu T_{zas} i temperatura otoczenia T_{zew}, czyli dwie zmienne, których ujemne wartości współczynnika korelacji (Tab. 10) budziły kontrowersje, są albo nieistotne albo relatywnie mało istotne dla modelu regresji.

Tabela 11.

Wyniki analizy regresji wielorakiej określającej zależność skorygowanego ciepła ładowania $Q_{LAD+FAZ}$ (MJ) w ciągu 1-godzinnych okresów ładowania od analizowanych zmiennych, dla sekcji akumulatora o objętości 12,7÷51,5 m³ i zakresu strumieni powietrza 0,028÷0,306 m³·s⁻¹

| Wyszczególnienie | Współczynnik regresji b | Błąd standardowy współczynnika regresji b | Wartość statystyki t | Istotność wartości statystyki t |
|---|----------------------------|---|-------------------------|---------------------------------------|
| Wyraz wolny | -8,09 | 1,83 | -4,42 | 0,000011 |
| Strumień zatłaczanego powietrza q_{pow} (m ³ ·s ⁻¹) | 46,2 | 1,72 | 26,8 | 0,000000 |
| Różnica średnich temperatur zasysanego powietrza T_{zas} i tempera- tur złoża przed rozpoczęciem cyklu ładowania $T_{zloża}$; $\Delta T_{zas-zloża}$ (°C) | 0,656 | 0,0286 | 22,9 | 0,000000 |
| Objętość kruszywa w złożu V _{złoża} (m ³) | 0,122 | 0,00953 | 12,8 | 0,000000 |
| Średnia temperatura otoczenia T_{zew} (°C) | -0,216 | 0,0352 | -6,13 | 0,000000 |
| Nasłonecznienie R (Wh·m ⁻²) | 0,00306 | 0,00067 | 4,56 | 0,000006 |
| Średnia temperatura powietrza wewnątrz tunelu <i>Trośl</i> (°C) | 0,191 | 0,0593 | 3,22 | 0,001321 |
| Średnia temperatura złoża przed rozpoczęciem cyklu ładowania $T_{zloża}$ (°C) | -0,102 | 0,0662 | -1,55 | 0,122279 |

Metoda: krokowa postępująca; R²=88,8%; N=754; F(7,746)=853,73 p<0,0000

Temperatura otoczenia, nasłonecznienie, temperatura powietrza wewnątrz tunelu oraz temperatura złoża przed rozpoczęciem cyklu ładowania uzyskały najniższe wartości statystyki t-Studenta. W związku z tym ponowiono analizę regresji wielorakiej bez tych zmiennych. Uzyskany wówczas poprawiony współczynnik determinacji \mathbb{R}^2 był nieznacznie mniejszy i wynosił 87,4%. Równanie określające zależność ilości ciepła gromadzonego w złożu akumulatora $Q_{LAD+FAZ}$ (MJ) od badanych zmiennych przyjęło więc postać:

$$Q_{\pm AD + FAZ} = -9,99 + 53,5 \cdot q_{pow} + 0,724 \cdot \Delta T_{zas - zloża} + 0,0940 \cdot V_{zloża}$$
(29)

gdzie:

q_{pow} – strumień zatłaczanego powietrza w zakresie 0,028÷0,306 m³·s⁻¹
ΔT_{zas-złoża} – różnica średnich temperatur zasysanego powietrza i temperatur złoża przed rozpoczęciem cyklu ładowania w zakresie 3,6÷26,8°C
V_{złoża} – objętość kruszywa w złożu w zakresie 12,7÷51,5 m³

Analiza współzależności mierzonych i obliczanych zmiennych wykazała istotny wpływ wszystkich analizowanych zmiennych na wartości ciepła rozładowywania obliczane obiema metodami, tj. Q_{ROZŁAD+FAZ} i Q_{ROZŁAD} (Tab. 12).

Tabela 12.

Współczynniki korelacji pomiędzy ciepłem rozładowywania, obliczanym dwoma metodami, a wybranymi zmiennymi pomiarowymi wyznaczone dla 1-godzinnych okresów rozładowywania sekcji akumulatora o objętości 12,7 \div 51,5 m³ i zakresu strumieni powietrza 0,03 \div 0,305 m³·s⁻¹

| Zmienna niezależna | Współczynniki korelacji r Pearsona oraz poziomy ich istotności p | |
|--|--|---|
| | Ciepło rozładowywania skorygowane o bilans przemian fazowych wody Q _{ROZŁAD+FAZ} , w czasie 1 godz. (MJ) | Ciepło rozładowywania Q _{ROZŁAD} , w czasie 1 godz. (MJ) |
| Objętość kruszywa w złożu Vzloża (m ³) | 0,454 (p=0,000) | 0,490 (p=0,000) |
| Średnia temperatura otoczenia T_{zew} (°C) | -0,550 (p=0,000) | -0,492 (p=0,000) |
| Średnia temperatura powietrza zasysanego spomiędzy roślin T_{zas} (= T_{rosl}) (°C) | -0,367 (p=0,000) | -0,321 (p=0,000) |
| Strumień zatłaczanego powietrza q_{pow} (m ³ ·s ⁻¹) | 0,829 (p=0,000) | 0,844 (p=0,000) |
| Średnia temperatura złoża przed rozpo- częciem cyklu rozładowywania $T_{zloża}$ (°C) | -0,0898 (p=0,017) | -0,133 (p=0,000) |
| Różnica średnich temperatur powietrza zasysanego T_{zas} i temperatur złoża przed rozpoczęciem cyklu rozładowywania $T_{zloża}$; $\Delta T_{zas-zloża}$ (°C) | -0,272 (p=0,000) | -0,194 (p=0,000) |

Zakresy pomiarowe analizowanych zmiennych: $V_{zloża}=12,7\div51,5 \text{ m}^3$; $T_{zew}=6,6\div31,5^\circ\text{C}$; $T_{zas}=T_{rosl}=12,6\div37,8^\circ\text{C}$; $q_{pow}=0,03\div0,305 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; $T_{zloża}=18,4\div26,9^\circ\text{C}$; $\Delta T_{zas-zloża}=-9,6\div15,2^\circ\text{C}$ Liczba ważnych obserwacji N=710

W celu określenia łącznego wpływu czynników środowiskowych i stanu akumulatora przeprowadzono analizę regresji wielorakiej krokowej postępującej uwzględniającej zmienne niezależne wymienione w tabeli 12. Analiza wykazała, że spośród ośmiu uwzględnionych zmiennych niezależnych cztery uzyskały istotnie wysokie wartości statystyki t-Studenta (Tab. 13). Zwiększenie zakresu analizowanych wartości zmiennej V_{złoża} spowodowało znaczący, ponad 3-krotny, wzrost statystyki t-Studenta dla tej zmiennej. Otrzymana regresja wieloraka cechowała się poprawionym współczynnikiem determinacji $R^2=78,0\%$. Analogiczna analiza regresji wielorakiej wykonana dla niekorygowanego ciepła rozładowywania Q_{ROZLAD} cechowała się nieznacznie mniejszym poprawionym współczynnikiem determinacji $R^2=74,7\%$.
Tabela 13.

Wyniki analizy regresji wielorakiej określającej zależność skorygowanego ciepła rozładowywania $Q_{ROZLAD+FAZ}$ (MJ) w ciągu 1-godzinnych okresów rozładowywania od analizowanych zmiennych, dla sekcji akumulatora o objętości 12,7÷51,5 m³ i zakresu strumieni powietrza 0,03÷0,305 m³·s⁻¹

| Wyszczególnienie | Współczynnik regresji b | Błąd standardowy współczynnika regresij b | Wartość statystyki t | Istotność wartości statystyki t |
|--|----------------------------|---|-------------------------|---------------------------------------|
| Wyraz wolny | -6,28 | 0,86 | -7,31 | 0,000000 |
| Strumień zatłaczanego powietrza q_{pow} (m ³ ·s ⁻¹) | 31,9 | 1,06 | 30,0 | 0,000000 |
| Średnia temperatura złoża przed rozpoczęciem cyklu rozładowywania $T_{zloża}$ (°C) | 0,457 | 0,0399 | 11,5 | 0,000000 |
| Objętość kruszywa w złożu V _{złoża} (m ³) | -0,0669 | 0,00598 | -11,2 | 0,000000 |
| Średnia temperatura otoczenia T_{zew} (°C) | -0,212 | 0,0347 | -6,10 | 0,000000 |
| Średnia temperatura powietrza zasy- sanego spomiędzy roślin T_{zas} (= $T_{rośl}$) (°C) | 0,0222 | 0,0520 | 0,427 | 0,669643 |

Metoda: krokowa postępująca; R²=78,0%; N=710; F(5,704)=504,37 p<0,0000

Temperatura otoczenia oraz temperatura powietrza wewnątrz tunelu uzyskały najniższe wartości statystyki t-Studenta. Z tego powodu ponowiono analizę regresji wielorakiej bez tych zmiennych. Uzyskany poprawiony współczynnik determinacji R^2 był nieznacznie mniejszy i wynosił 74,4%. Równanie określające zależność ilości ciepła odbieranego ze złoża akumulatora $Q_{ROZLAD+FAZ}$ (MJ) od badanych zmiennych przyjęło postać:

$$Q_{ROZLAD+FAZ} = -7,73 + 35,5 \cdot q_{pow} - 0,0706 \cdot V_{zloża} + 0,382 \cdot T_{zloża}$$
(30)

gdzie:

| q_{pow} | _ | strumień zatłaczanego powietrza w zakresie 0,03÷0,305 m ³ ·s ⁻¹ | | | | | | | |
|-------------|---|---|--|--|--|--|--|--|--|
| Vzłoża | _ | objętość kruszywa w złożu w zakresie 12,7÷51,5 m ³ | | | | | | | |
| $T_{zloża}$ | _ | średnia temperatura złoża przed rozpoczęciem cyklu rozładowywania | | | | | | | |
| | | w zakresie 18.4÷26.9°C | | | | | | | |

Wyniki przeprowadzonych analiz współzależności zmiennych potwierdzają przypuszczenia, że wielkość złoża akumulatora oraz strumienia zatłaczanego powietrza są pozytywnie skorelowane z ilością ciepła gromadzonego w akumulatorze lub z niego odzyskiwanego. Również parametry środowiskowe wpływające na różnicę pomiędzy temperaturą powietrza zatłaczanego do akumulatora ciepła, a temperaturą złoża są, w większości przypadków, odpowiednio skorelowane z ilością ciepła gromadzonego w akumulatorze lub z niego odzyskiwanego. W przypadku ładowania akumulatora ciepła, większe natężenie promieniowania słonecznego mierzone na zewnatrz obiektu szklarniowego determinuje pozytywnie ilość ciepła powstająca w wyniku konwersji wewnatrz tego obiektu i, w efekcie, podnosi temperaturę powietrza zatłaczanego do akumulatora, zwiekszając ilość ciepła gromadzonego w akumulatorze. W przypadku rozładowywania, które jest przeprowadzane zazwyczaj w nocy lub w chłodnie/pochmurne dni, wyższa temperatura otoczenia obiektu szklarniowego determinuje wyższą temperaturę powietrza wewnątrz tunelu/szklarni, które jest zatłaczane do akumulatora i w ten sposób obniża ilość ciepła odbieranego z akumulatora. Ujemne współczynniki korelacji, niespodziewanie uzyskane dla temperatury powietrza wewnątrz tunelu i temperatury otoczenia podczas ładowania akumulatora (Tab. 6, Rys. 35 i Tab. 10) najprawdopodobniej sa zwiazane z warunkami środowiskowymi panującymi w okresie prowadzenia omawianych w tym rozdziale badań. Badania rozpoczęto 17 maja, po zakończeniu wiosennych ochłodzeń i trwały do trzeciej dekady sierpnia. W tym okresie panowały najwyższe temperatury otoczenia w nocy, a zarazem stwierdzono najwyższe dawki nasłonecznienia w ciagu dnia (Rys. 16). Powodowało to częste sytuacje, gdy akumulator naładowany jednego dnia nie zdołał się rozładować w ciągu nocy i podczas ładowania, choć bardziej adekwatnym określeniem byłby termin "doładowywanie", kolejnego dnia gromadził tylko niewielkie ilości ciepła. Przypadki takie można zaobserwować na Rys. 35, w jego prawej dolnej części, co powodowało uzyskanie ujemnego współczynnika korelacji pomiędzy przedstawionymi zmiennymi.



Rys. 35. Wpływ średniej temperatury otoczenia na ilość ciepła zgromadzonego w akumulatorze skorygowanego o bilans przemian fazowych wody, dla 1-godzinnych okresów ładowania akumulatora od 17 maja do 7 sierpnia 2013 roku, przy wykorzystaniu wszystkich sekcji akumulatora

Przeprowadzone analizy regresji wielorakiej określające zależność ciepła ładowania lub ciepła rozładowywania akumulatora od badanych zmiennych wskazały strumień zatłaczanego powietrza q_{pow} jako zmienną o największym wkładzie do predykcji zmiennych zależnych. W przypadku równań predykcji ciepła ładowania, drugą co do wielkości wkładu była różnica średnich temperatur zasysanego powietrza i temperatur złoża przed rozpoczęciem cyklu ładowania $\Delta T_{zas-złoża}$. Natomiast w przypadku równań predykcji ciepła rozładowywania, drugą co do wielkości wkładu była temperatura złoża przed rozpoczęciem cyklu rozładowywania Tzłoża. Wkład objętości kruszywa w złożu do predykcji zmiennych zależnych był oceniony jako jeszcze mniejszy, lecz nadal istotny. Jako nietypową sytuację można uznać fakt, że w dwóch, z prezentowanych czterech, równaniach predykcji współczynniki regresji dla objętości kruszywa miały wartość ujemną. Sugerowałoby to, że wraz ze wzrostem wielkości złoża ilość ciepła gromadzonego lub oddawanego będzie maleć. Należy jednak pamiętać, że w analizie regresji wielorakiej zmienne niezależne uszeregowane na dalszych miejscach pod względem wielkości wkładu do predykcji zmiennej zależnej są skorelowane ze zmienną zależną po uwzględnieniu wpływu wszystkich wcześniejszych zmiennych niezależnych (Dell Inc., 2016). Dlatego wartości korelacji czastkowych w regresji wielorakiej nie muszą być zgodne ani co do wielkości, ani co do znaku z wartościami współczynników korelacji Pearsona wyznaczonymi wcześniej w niniejszym rozdziale.

6.4. Wpływ zastosowania akumulatora na mikroklimat w tunelu foliowym

6.4.1. Wpływ zastosowania akumulatora w trybie dogrzewania roślin

Monitorowanie warunków środowiskowych w tunelach obsadzonych warzywami przeprowadzono w pierwszych miesiącach sezonu 2014 roku, w okresie od 11 kwietnia do końca czerwca. Obserwacjami objęto trzy tunele foliowe. Dwa z nich stanowiły tunele współpracujące z dwoma oddzielnymi akumulatorami ciepła (Rys. 2). Zdecydowano się na analizę danych z dwóch tuneli wspomaganych akumulatorami, aby wyeliminować wpływ możliwych różnic w wykonaniu akumulatorów i zwiększyć wiarygodność wyników. Oba akumulatory pracowały według tej samej procedury. Trzeci tunel służył jako obiekt kontrolny.

Ze względu na naturalną zmienność warunków pogodowych w kolejnych dniach, porównywanie stanu mikroklimatu w obserwowanych tunelach przeprowadzono nie dla tych samych godzin dnia, lecz dla tych samych warunków nasłonecznienia. Jak opisano w rozdziale 5.4 w zakresie obserwowanego natężenia promieniowania słonecznego wydzielono dziewięć grup wielkości tego parametru definiując arbitralnie przedziały symulujące części doby, od wartości minimalnych nazwanych jako "Noc", przez okresy odpowiadające porom od świtu do środka dnia, a później w odwrotnej kolejności do zmierzchu. Jako wartość graniczną natężenia promieniowania słonecznego przyjęto 800 W·m⁻². Analizie poddano dwie zmienne środowiskowe: temperaturę powietrza mierzoną wewnątrz tunelu pomiędzy roślinami i deficyt ciśnienia pary wodnej (VPD) obliczany na podstawie tej temperatury oraz wilgotności względnej powietrza mierzonej w tym samym miejscu. Dane dla kolejnych miesięcy kalendarzowych i podzielone według przyjętych grup wielkości natężenia nasłonecznienia poddano jednoczynnikowej analizie wariancji, osobno dla każdej grupy wielkości promieniowania. Wyniki zostały przedstawione na rysunkach 37-42.



Rys. 36. Temperatura powietrza w monitorowanych tunelach w okresie kwiecień-lipiec 2014 roku dla zakresu natężenia promieniowania słonecznego 0-5 W·m⁻²

Dla każdego z monitorowanych miesięcy temperatura powietrza w nocy wewnątrz tunelu była najniższa w tunelu bez akumulatora (Rys. 36). W kwietniu wyniosła ona średnio 11,8°C, w maju 13,7°C, a w czerwcu 15,6°C. Temperatura w tunelach wyposażonych w akumulatory ciepła była w tych okresach wyższa o co najmniej 2,4°C w kwietniu, 2,7°C w maju i 2,2°C w czerwcu. Dla zakresu natężenia promieniowania słonecznego 5-100 W m⁻² nadal najniższe temperatury zanotowano w tunelu kontrolnym, czyli bez akumulatora. Natomiast w obu tunelach średnie temperatury powietrza były nadal wyższe, chociaż różnice były mniejsze i wynosiły 1,2°C w kwietniu i maju oraz 1,3°C w czerwcu. Dla kolejnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego średnie temperatury powietrza nie wykazywały już jednoznacznego schematu różnic pomiędzy tunelem kontrolnym, a tunelami współpracującymi z akumulatorami ciepła. W kwietniu jeden z tuneli z akumulatorem ciepła nie wykazywał

istotnych różnic w stosunku do tunelu kontrolnego w ciągu dnia, za to drugi z tuneli z akumulatorem ciepła wykazywał temperatury istotnie niższe. Za to w czerwcu oba tunele współpracujące z akumulatorami ciepła wykazywały w ciągu dnia temperatury istotnie niższe w stosunku do tunelu kontrolnego. Niższe temperatury powietrza pomiędzy roślinami w tunelach współpracujących z akumulatorami ciepła mogły być spowodowane dwoma czynnikami. Po pierwsze, powietrze zasysano do akumulatora z górnej części tunelu, znajdującej się bezpośrednio pod wywietrznikami. W tej sytuacji praca wentylatora wymuszała większą wymianę powietrza w tunelu i większy napływ chłodniejszego powietrza z zewnątrz tunelu (Rys. 7). Po drugie, gdy temperatura wśród roślin była wyższa niż przyjęta wartość temperatury progowej T_{PS} chłodniejsze powietrze wypływające z akumulatora było kierowane do wnętrza tunelu (Rys. 14). Ten zabieg również mógł przyczynić się do obniżenia temperatury w tunelach współpracujących z akumulatorami ciepła.



Rys. 37. Temperatura powietrza w monitorowanych tunelach w kwietniu 2014 roku dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego. Linie łączące wartości średnie analizowanych wielkości są zamieszczone w celu łatwiejszej interpretacji przedstawionych danych. Średnie dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie (ANOVA, test Duncana, $p \le 0,05$)



Rys. 38. Temperatura powietrza w monitorowanych tunelach w maju 2014 roku dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego. Linie łączące wartości średnie analizowanych wielkości są zamieszczone w celu łatwiejszej interpretacji przedstawionych danych. Średnie dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie (ANOVA, test Duncana, $p \le 0,05$)

Istotnie wyższe nocne oraz często również istotnie niższe dzienne temperatury powietrza w tunelach współpracujących z akumulatorami ciepła, w porównaniu z temperaturą powietrza w tunelu kontrolnym, wskazują, że dobowa amplituda temperatur powietrza w tunelach współpracujących z akumulatorami ciepła była niższa niż w tunelu kontrolnym.



Rys. 39. Temperatura powietrza w monitorowanych tunelach w czerwcu 2014 roku dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego. Linie łączące wartości średnie analizowanych wielkości są zamieszczone w celu łatwiejszej interpretacji przedstawionych danych. Średnie dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie (ANOVA, test Duncana, $p \le 0,05$)



Rys. 40. Deficyt ciśnienia pary wodnej w monitorowanych tunelach w kwietniu 2014 roku dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego. Linie łączące wartości średnie analizowanych wielkości są zamieszczone w celu łatwiejszej interpretacji przedstawionych danych. Średnie dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie (ANOVA, test Duncana, $p \le 0,05$)

Analiza wartości VPD obliczonych dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego wykazała, że zarówno dla warunków nocnych (0-5 $W \cdot m^{-2}$) jak i przy bardzo niskim natężeniu radiacji 5-100 $W \cdot m^{-2}$ wartości deficytu ciśnienia pary wodnej były niskie lub bardzo niskie we wszystkich monitorowanych tunelach. Niemniej prawie zawsze poziom VPD był istotnie niższy w tunelu bez akumulatora ciepła. W ciągu dnia zależności pomiędzy tunelami zmieniały się w trakcie sezonu wegetacyjnego i trudno określić jednoznacznie, czy w poszczególnych przedziałach natężenia promieniowania wartości VPD były bardziej lub mniej korzystne w tunelach wyposażonych w akumulatory ciepła.



Rys. 41. Deficyt ciśnienia pary wodnej w monitorowanych tunelach w maju 2014 roku dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego. Linie łączące wartości średnie analizowanych wielkości są zamieszczone w celu łatwiejszej interpretacji przedstawionych danych. Średnie dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie (ANOVA, test Duncana, $p \le 0,05$)



Rys. 42. Deficyt ciśnienia pary wodnej w monitorowanych tunelach w czerwcu 2014 roku dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego. Linie łączące wartości średnie analizowanych wielkości są zamieszczone w celu łatwiejszej interpretacji przedstawionych danych. Średnie dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego oznaczone takimi samymi literami nie różnią się istotnie (ANOVA, test Duncana, $p \le 0,05$)

Warunki panujące w tunelu współpracującym z akumulatorem ciepła i w tunelu bez akumulatora panujące podczas uprawy ogórka w sezonie 2013 przeanalizowali Konopacki i in. (2018). Obliczyli okresy, w których VPD: było równe lub niższe 200 Pa, znajdowało się przedziałach 200÷400 Pa oraz 400÷1400 Pa, lub było wyższe niż 1400 Pa. Wyniki obliczeń wskazywały, że dla całego okresu uprawowego, czyli od kwietnia do października, w tunelu kontrolnym warunki o VPD poniżej 200 Pa panowały znacznie dłużej niż w tunelu współpracującym z akumulatorem ciepła (Rys. 43). Również czas w którym VPD był wyższy niż 1400 Pa był krótszy tunelu współpracującym z akumulatorem ciepła. Ponieważ uzyskane wyniki były pojedynczymi wartościami liczbowymi dla poszczególnych przedziałów VPD i miesięcy, to nie można było przeprowadzić analizy statystycznej. Jednak opisana powyżej zależność powtarzała się w każdym kolejnym miesiącu w analizowanym sezonie, oprócz czerwca, kiedy okresy czasu gdy VPD było wyższe niż 1,4 kPa różniły się o 0,1% pomiędzy tunelem z akumulatorem ciepła a tunelem kontrolnym. Dodatkowo udziały czasu, gdy VPD znajdowało się w przedziale uznanym za optymalny dla roślin, tj. w zakresie 0,4÷1,4 kPa, dla wszystkich miesięcy były większe dla tunelu z akumulatorem ciepła.



Rys. 43. Udziały procentowe czasu, oddzielnie dla poszczególnych miesięcy od kwietnia do połowy października 2013, w których wilgotność powietrza znajdowała się w założonych przedziałach deficytu ciśnienia pary wodnej (VPD) (kPa)

Źródło: Konopacki i in., 2018

6.4.2. Wpływ zastosowania akumulatora na wzrost i plonowanie roślin w tunelu foliowym

W osobnych tunelach wyposażonych w akumulatory ciepła uprawiano rośliny pomidora i ogórka. Te same gatunki roślin uprawiano w tunelach kontrolnych. Obserwacje wzrostu roślin wykazały, że już w początkowej fazie wzrostu roślin podwyższona temperatura podłoża, spowodowana doprowadzaniem ciepłego powietrza z akumulatora bezpośrednio pod maty uprawowe, wpłyneła na lepsze ukorzenienie roślin uprawianych w tunelach współpracujących z akumulatorami ciepła. Było to widoczne zwłaszcza podczas wiosennej uprawy ogórka odmiany 'Melen' F1 w 2013 roku, gdzie 75-77,5% dogrzewanych roślin było bardzo dobrze ukorzenionych, podczas gdy w tunelu kontrolnym taki poziom ukorzenienia uzyskało zaledwie 30-32% roślin (Nowak i in., 2015). Użycie akumulatora ciepła wpłynęło również pozytywnie na przyspieszenie plonowania ogórka (pierwsze 5 zbiorów), które w uprawie wiosennej w 2012 roku było wyższe o ponad 23%, a w 2013 roku o 26% wyższe niż plon w tunelu kontrolnym. Podobne efekty uzyskano w 2012 roku w uprawie pomidora odmiany 'Tamaris' F₁, pomimo, że gatunek ten jest mniej wrażliwy na niskie temperatury niż ogórek. W tunelu wyposażonym w akumulator ciepła dobre i bardzo dobre ukorzenienie stwierdzono u 90-95% roślin, podczas gdy w obiekcie kontrolnym stwierdzono słabe ukorzenienie, które wynosiło zaledwie 50-62% (Nowak i in., 2014b). Również wczesny plon pomidora był wyższy w tunelu współpracującym z akumulatorem ciepła niż w tunelu kontrolnym. Plon handlowy z pierwszych trzech zbiorów był wyższy o średnio 1,48 kg·m⁻², w tym pomidorów frakcji BB (kaliber 67÷82 mm) było więcej o 0,95 kg·m⁻². Różnice w wielkości plonów i stopniu wybarwienia owoców pomidora na początku sezonu 2014 roku przedstawiono na rysunkach 44 i 45.



Rys. 44. Widok owoców pomidora w tunelu kontrolnym w dniu 2 lipca 2014 roku, tuż przed trzecim zbiorem w tym sezonie



Rys. 45. Widok owoców pomidora w tunelu wyposażonym w akumulator ciepła w dniu 2 lipca 2014 roku, tuż przed trzecim zbiorem w tym sezonie

Poprawa mikroklimatu w zakresie wilgotności powietrza była również widoczna w uprawie ogórka poprzez znacznie lepszą kondycję roślin. Zaobserwowano mniejsze występowanie chorób grzybowych wśród roślin dogrzewanych akumulatorem ciepła, co pozwoliło na zmniejszenie liczby chemicznych zabiegów ochrony roślin (Nowak i in., 2014a). Generalnie w tunelach dogrzewanych ciepłem z akumulatora w nocy i schładzanym w ciągu dnia obserwowano znacznie rzadsze objawy nieprawidłowego wykształcania i wybarwiania się owoców ogórka i pomidora.

6.4.3. Wpływ zastosowania akumulatora w trybie chłodzenia

Wartości temperatur rejestrowane w godzinach nocnych w sezonie 2014 w tunelu kontrolnym sukcesywnie rosły w trakcie sezonu (Rys. 37 – 39). Tempo wzrostu sugerowało, że w środku lata, w lipcu i sierpniu, temperatura powietrza wewnątrz tunelu tylko sporadycznie będzie obniżała się poniżej dolnej granicy zakresu uznawanego za właściwy dla uprawy roślin, która dla pomidora wynosi ok. 17°C, a dla ogórka 18°C (Nowak i in., 2014b). Dodatkowo maksymalne temperatury osiągane w ciągu dnia już w kwietniu i maju osiągały, lub nawet przekraczały 29°C, co oznaczało regularne przekraczanie górnej granicy zakresu temperatur optymalnych dla uprawy pomidora, która wynosi 27°C. Podjęto wówczas decyzję o wykorzystaniu jednego z tuneli wyposażonych w akumulator ciepła do schładzania roślin, poprzez schładzanie złoża akumulatora w nocy i wtłaczaniu do wnętrza tunelu w dzień powietrza o jak najniższej temperaturze (Rys. 9 i 11). Dodatkowo, w procedurze sterowania akumulatorem uwzględniono możliwość dogrzewania wnętrza w tunelu, gdyby temperatura w środku tunelu obniżała się poniżej założonego progu wymagającego dogrzewanie roślin (Rys. 10). Do rozpoczęcia pracy akumulatora w ten sposób wymagane było spełnienie warunku, że temperatura złoża w akumulatorze musi być wyższa niż temperatura powietrza w tunelu. Oprócz wyposażenia instalacji w rurę PCW pozwalającą na zasysanie powietrza spoza tunelu, oraz zestawu przepustnic umożliwiających taki przepływ powietrza rzędy roślin wewnątrz tunelu zostały osłonięte kurtynami foliowymi ograniczającymi odpływ chłodnego powietrza od roślin. Przestawienie akumulatora na tryb chłodzenia wykonano 4 lipca 2014 roku. Akumulator pracował w tym trybie do 26 sierpnia. Przez kilka pierwszych dni złoże akumulatora było wychładzane w godzinach nocnych, wobec czego analizę działania akumulatora w trybie chłodzenia rozpoczęto dla danych zarejestrowanych począwszy od 11 lipca.



Rys. 46. Temperatura powietrza w tunelach foliowych w okresie 11-31 lipca 2014 roku dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego. Linie łączące wartości średnie analizowanych wielkości są zamieszczone w celu łatwiejszej interpretacji przedstawionych danych

Poziomy temperatur mierzonych wewnątrz tunelu współpracującego z akumulatorem pracującym w trybie chłodzenia (Rys. 46 i 47) nie pozwalają na sformułowanie jednoznacznych wniosków. W lipcu 2014 roku temperatura mierzona w ciągu dnia w sąsiedztwie roślin na wysokości 1,5 m była albo taka sama, albo nawet wyższa niż temperatura zarejestrowana w tunelu kontrolnym. Natomiast w sierpniu 2014 roku temperatury mierzone wśród roślin w tunelu współpracującym z akumulatorem działającym w trybie chłodzenia były albo takie same, albo niższe niż temperatury zarejestrowane w tunelu kontrolnym. Jedynie temperatury zarejestrowane w godzinach nocnych w tunelu współpracującym z akumulatorem działającym w trybie chłodzenia były w obu miesiącach wyższe od temperatur w tunelu kontrolnym. Oznacza to, że pomimo nocnego schładzania złoża akumulatora temperatura powietrza z niego wypływającego była jeszcze wystarczająco wysoka, aby efektywnie podgrzewać powietrze wewnątrz tunelu.



Rys. 47. Temperatura powietrza w tunelach foliowych w sierpniu 2014 roku dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego. Linie łączące wartości średnie analizowanych wielkości są zamieszczone w celu łatwiejszej interpretacji przedstawionych danych

Brak jednoznacznie widocznego wpływu działania akumulatora w trybie chłodzenia na temperaturę powietrza pomiędzy roślinami, nie oznacza jednak, że praca tego akumulatora nie schładzała roślin. Brak widocznych efektów na rysunkach 46 i 47 wynika z faktu, że punkty pomiary temperatury powietrza pomiędzy roślinami znajdowały się wewnątrz tuneli na wysokości ok. 1,5 m, na granicy strefy liści roślin i środkowego przejścia pomiędzy rzędami roślin. Tymczasem zimne powietrze rozprowadzane przez rękawy foliowe usytuowane pod rynnami uprawowymi nie wznosi się do góry, tylko ma tendencję do rozpływania się na boki od rynien uprawowych.



Rys. 48. Temperatura powietrza mierzona pomiędzy roślinami i powietrza wypływającego z akumulatora w tunelach foliowych w kwietniu 2014 roku dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego. Linie łączące wartości średnie analizowanych wielkości są zamieszczone w celu łatwiejszej interpretacji przedstawionych danych

Porównanie temperatur powietrza pomiędzy roślinami i wypływającego z akumulatorów ciepła pracujących w okresie 11.04-30.06.2014, czyli przed rozpoczęciem chłodzenia, w podstawowym trybie dogrzewania roślin w nocy wykazało (Rys. 48 - 50), że w kolejnych miesiącach dogrzewania roślin temperatura powietrza wypływającego z akumulatorów była średnio o 3.9°C wyższa niż temperatura mierzona pomiedzy roślinami. Z kolej w ciągu dnia, dla kolejnych poziomów nateżenia promieniowania słonecznego, temperatura pomiedzy roślinami sukcesywnie rosła, podczas gdy temperatura powietrza wypływającego z akumulatora była zawsze o kilka stopni niższa. Zależności te były obserwowane w obydwóch tunelach wyposażonych w akumulatory ciepła, które w tym okresie pracowały w trybie dogrzewania roślin. Różnice temperatur w kwietniu wyniosły od 3,8°C dla przedziału radiacji 100÷200 W·m⁻², średnio dla obu tuneli, do 11,7°C dla przedziału radiacji 700÷800 W·m⁻². W maju 2014 różnice te kształtowały się od 3,5°C dla przedziału radiacji 100÷200 W·m⁻², do 5,8°C dla przedziału radiacji 600÷700 W·m⁻². Natomiast w czerwcu różnice te wyniosły od 0,8°C dla przedziału radiacji 100÷200 W·m⁻², do 4,2°C dla przedziału radiacji 700÷800 $W \cdot m^{-2}$. W tym czasie temperatura powietrza wypływającego z akumulatora nr 2 była prawie zawsze wyższa od temperatury powietrza wypływającego z akumulatora nr 1 (Tab. 14)

Tabela 14.

Średnie temperatury powietrza na wylocie z dwóch akumulatorów pracujących w trybie dogrzewania roślin dla różnych zakresów natężenia promieniowania słonecznego, mierzone w okresie od 11 kwietnia do 30 czerwca 2014 roku

| Zakres natężenia promienio- wania słonecznego (W·m ⁻²) | 100-200 | 200-300 | 300-400 | 400-500 | 500-600 | 600-700 | 700-800 |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Liczba przypadków | 18376 | 17836 | 12457 | 10768 | 8371 | 3635 | 2520 |
| Temperatura powietrza na wylocie z akumulatora nr 1 (°C) | 19,8 | 20,6 | 20,9 | 22,0 | 22,0 | 20,9 | 21,1 |
| Temperatura powietrza na wylocie z akumulatora nr 2 (°C) | 19,8 | 21,2 | 21,6 | 22,3 | 22,9 | 21,2 | 21,4 |
| Różnica temperatur (°C) | 0 | 0,6 | 0,7 | 0,3 | 0,9 | 0,3 | 0,3 |



Rys. 49. Temperatura powietrza pomiędzy roślinami i powietrza wypływającego z akumulatora w tunelach foliowych w maju 2014 roku dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego. Linie łączące wartości średnie analizowanych wielkości są zamieszczone w celu łatwiejszej interpretacji przedstawionych danych



Rys. 50. Temperatura powietrza pomiędzy roślinami i powietrza wypływającego z akumulatora w tunelach foliowych w czerwcu 2014 roku dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego. Linie łączące wartości średnie analizowanych wielkości są zamieszczone w celu łatwiejszej interpretacji przedstawionych danych

Po zmianie trybu pracy akumulatora nr 2 na schładzanie roślin w dzień, stwierdzono znaczne obniżenie temperatury powietrza wypływającego z tego akumulatora w porównaniu do temperatury powietrza wypływającego z akumulatora nr 1, który nadal pracował w trybie dogrzewania roślin w nocy (Rys. 51 i 52). O ile w poprzednim okresie, gdy obydwa akumulatory pracowały w trybie dogrzewania, powietrze wypływające z akumulatora nr 2 miało prawie zawsze temperaturę wyższą niż powietrze wypływające z akumulatora nr 1, to po zmianie trybu pracy akumulatora nr 1 na schładzanie roślin w ciągu dnia, powietrze z niego wypływające było zawsze chłodniejsze. Różnica temperatur wynosiła od 1,5°C dla zakresu natężenia promieniowania słonecznego 100÷200 W·m⁻², do 3,8°C dla zakresu natężenia promieniowania słonecznego 600÷700 W·m⁻² (Tab. 15). Jednocześnie średnia temperatura mierzona pomiędzy roślinami w tunelu współpracującym z akumulatorem nr 1, który pracował w trybie dogrzewania. Różnica ta wynosiła od 0 dla zakresów natężenia promieniowania słonecznego 100÷200 W·m⁻² to 0,6°C dla zakresów natężenia promieniowania słonecznego 400÷500 W·m⁻² i 500÷600 W·m⁻².

Tabela 15.

Średnie temperatury powietrza pomiędzy roślinami oraz na wylotach z akumulatora pracującego w trybie dogrzewania roślin w nocy i akumulatora pracującego w trybie schładzania roślin w dzień, dla różnych zakresów natężenia promieniowania słonecznego, mierzone w okresie od 11 lipca do 26 sierpnia 2014 roku

| Zakres natężenia promieniowania słonecznego (W·m ⁻²) | 100-200 | 200-300 | 300-400 | 400-500 | 500-600 | 600-700 | 700-800 |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Liczba przypadków | 5877 | 4985 | 3351 | 2800 | 2921 | 3741 | 1713 |
| Temperatura powietrza na wylocie z akumulatora nr 1 (tryb dogrzewania) T _{WY_1} (°C) | 21,8 | 22,4 | 22,6 | 22,8 | 23,4 | 24,1 | 23,5 |
| Temperatura powietrza po- między roślinami w tunelu nr 1 T _{rośl_1} (°C) | 23,7 | 25,3 | 26,5 | 27,5 | 28,2 | 28,5 | 28,1 |
| Temperatura powietrza na wylocie z akumulatora nr 2 (tryb schładzania) T _{WY_2} (°C) | 20,3 | 20,6 | 20,6 | 20,4 | 20,1 | 20,3 | 20,0 |
| Temperatura powietrza pomiędzy roślinami w tunelu nr 2 T _{rośl_2} (°C) | 23,7 | 25,2 | 26,2 | 26,9 | 27,6 | 28,4 | 28,1 |
| Różnica pomiędzy tempera- turą na wylocie z akumula- tora nr 1 a temperaturą pomiędzy roślinami w tunelu nr 1 TwY_1-Trośl_1 (°C) | -1,9 | -2,9 | -3,9 | -4,7 | -4,8 | -4,4 | -4,6 |
| Różnica pomiędzy tempera- turą na wylocie z akumula- tora nr 2 a temperaturą pomiędzy roślinami w tunelu nr 2 Twy_2-Trośl_2 (°C) | -3,4 | -4,6 | -5,6 | -6,5 | -7,5 | -8,1 | -8,1 |
| Różnica temperatur pomię- dzy wylotem z akumulatora nr 2 a wylotem z akumulatora nr 1 T _{WY_2} -T _{WY_1} (°C) | -1,5 | -1,8 | -2,0 | -2,4 | -3,3 | -3,8 | -3,5 |



Rys. 51. Temperatura powietrza pomiędzy roślinami i powietrza wypływającego z akumulatora w monitorowanych tunelach w okresie 11-31 lipca 2014 roku dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego. Linie łączące wartości średnie analizowanych wielkości są zamieszczone w celu łatwiejszej interpretacji przedstawionych danych



Rys. 52. Temperatura powietrza pomiędzy roślinami i powietrza wypływającego z akumulatora w monitorowanych tunelach w sierpniu 2014 roku dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego. Linie łączące wartości średnie analizowanych wielkości są zamieszczone w celu łatwiejszej interpretacji przedstawionych danych

Przełączenie akumulatora nr 2 na schładzanie roślin w dzień wpłynęło również na poziom deficytu ciśnienia pary wodnej (VPD) w wypływającym z niego powietrzu (Rys. 53 i 54). Różnica ta pomiędzy powietrzem wypływającym z akumulatora nr 1 i z akumulatora nr 2, dla zakresu natężenia promieniowania słonecznego $100\div200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ wyniosła średnio 80 Pa. W miarę wzrostu natężenia promieniowania słonecznego różnica ta zwiększała się i dla zakresu natężenia promieniowania słonecznego $100\div200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ wyniosła średnio 403 Pa. Oznacza to, że powietrze wypływające z akumulatora pracującego w trybie schładzania roślin w dzień było bardziej wilgotne. Jest to wynik niespodziewany, bowiem przy tym trybie pracy powietrze zatłaczane do akumulatora zarówno w nocy, jak i w dzień było pobierane z zewnątrz tunelu, a wiec było suchsze niż powietrze znajdujące się wewnątrz tunelu, które było cały czas nawilżane poprzez transpirację roślin. Jednak pomimo niższego poziomu VPD, powietrze wypływające z akumulatora nr 2 cechowało się poziomem deficytu ciśnienia pary wodnej znacznie powyżej 400 Pa, co, jak podano w poprzednim rozdziale jest dolną granicą zakresu VPD optymalnego dla uprawianych roślin.



Rys. 53. Deficyt ciśnienia pary wodnej w powietrzu pomiędzy roślinami i powietrzu wypływającym z akumulatora w monitorowanych tunelach w okresie 11-31 lipca 2014 roku dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego. Linie łączące wartości średnie analizowanych wielkości są zamieszczone w celu łatwiejszej interpretacji przedstawionych danych



Rys. 54. Deficyt ciśnienia pary wodnej w powietrzu pomiędzy roślinami i powietrzu wypływającym z akumulatora w monitorowanych tunelach w sierpniu 2014 roku dla poszczególnych przedziałów natężenia promieniowania słonecznego. Linie łączące wartości średnie analizowanych wielkości są zamieszczone w celu łatwiejszej interpretacji przedstawionych danych

Utrzymanie korzystnego wpływu chłodnego powietrza na uprawiane rośliny wymaga ograniczenia strefy napływu powietrza z akumulatora do najbliższego otoczenia rzędów roślin. W tunelu współpracującym z akumulatorem pracującym w trybie schładzania roślin zagadnienie to rozwiązano poprzez otoczenie roślin kurtynami foliowymi (Rys. 55). Rozwiązanie to jest chronione patentem RP numer 228864 (Konopacki i in., 2014a).



Rys. 55. Kurtyny foliowe utrzymujące chłodne powietrze w najbliższym otoczeniu rzędów roślin

7. DYSKUSJA

Ilość energii promieniowania słonecznego dostepna w okresie wiosennym determinuje poczatek okresu efektywnego wykorzystywania akumulatora ciepła współpracującego z obiektem szklarniowym. Czym większe są wartości dobowego nasłonecznienia i wyższa temperatura otoczenia tunelu lub szklarni tym wyższe są dzienne temperatury powietrza wewnątrz tunelu, szczególnie w jego górnej części, w sąsiedztwie wywietrzników. Długie czasy ładowania akumulatora zarejestrowane w okresie wiosennym (Rys. 16) wskazują na duże ilości ciepła, które można zgromadzić w akumulatorze. Jednocześnie długie czasy rozładowywania akumulatora ciepła w tym okresie wskazują na wysokie zapotrzebowanie na ciepło w uprawie pod osłonami. Zarejestrowane różnice temperatur pomiędzy tunelami wyposażonymi w akumulatory ciepła a tunelem bez akumulatora, wynoszace w okresie wiosennym 2014 roku w nocy średnio co najmniej 2,2°C (Rys. 37, 38 i 39) świadczą, że akumulator ciepła jest w stanie dostarczyć znaczących ilości ciepła. Pomiary wykonane wiosną 2012 roku wykazały, że przy bardzo zimnych nocach akumulator ciepła jest w stanie podgrzać powietrze wewnątrz tunelu o 9,9°C (Konopacki i in., 2015), co może w okresie wiosennym ochronić rośliny przed przemarzaniem. W następnym sezonie zmierzona maksymalna wiosenna różnica temperatur pomiedzy wnetrzem tunelu a jego otoczeniem wyniosła 9,4°C (Konopacki i in., 2014b). Wprawdzie wartości te były mierzone w centralnych miejscach tuneli, gdzie temperatury są wyższe niż w pobliżu ścian tuneli, to pomiary termowizyjne (Sabat i in., 2013) wykazały, że gdy w nocy różnica temperatur rejestrowana standardowo wewnątrz tuneli wynosiła 2,7-3,1°C, to temperatura zewnetrznej powierzchni tuneli różniła sie o 1,1-1,4°C. Ilość ciepła możliwa do odzyskania z badanego akumulatora w nocy nie zależała bezpośrednio od ilości ciepła zgromadzonego w dzień poprzedni. Średnie dobowe czasy rozładowywania akumulatora w trzeciej dekadzie maja 2013 (Rys. 16) były o 93% dłuższe niż czasy jego ładowania. Tymczasem w poprzednich dwóch dekadach czasy ładowania i rozładowywania różniły się tylko o 6,7% w 1. dekadzie Maja i 2,3% w 2. dekadzie Maja. Wskazuje to na to, że w trzeciej dekadzie maja w złożu akumulatora była zgromadzona ilość ciepła wystarczająca do dogrzewania roślin w dni pochmurne, przy niekorzystnych warunkach dla doładowywania akumulatora. Dane z okresu 21-25 maja 2013 wskazują, że średnie dobowe nasłonecznie w tym okresie było o połowe niższe niż w pierwszych dwóch dekadach maja, a temperatura otoczenia w nocy z 25 na 26 maja obniżyła się do 6,3°C. Tymczasem średnia temperatura zarejestrowana tej nocy w tunelach dogrzewanych akumulatorami ciepła wyniosła 16,8°C, podczas gdy w tunelach kontrolnych była o 3,4°C niższa (Konopacki i in., 2014c). Świadczy to dużej ilości ciepła zgromadzonego w akumulatorze, co umożliwia stopniowe wykorzystywanie ciepłą w chłodniejsze dni. Podobne wyniki uzyskali Bouhdjar i in. (1996), którzy wykazali, że akumulator żwirowy może oddać podczas pojedynczego cyklu rozładowania wiecej ciepła niż zgromadził z dniu poprzednim. Również Kürklü i in. (2003) zanotowali, że akumulator ciepła utrzymywał nocą w tunelu wyższą temperaturę pomimo, że poprzedniego dnia zachmurzenie uniemożliwiło doładowanie akumulatora. Znacznie niższej efektywności pracy akumulatora ciepła można spodziewać się w okresie jesiennym, gdy zmniejsza się zarówno nasłonecznienie w dzień jak i temperatura otoczenia w nocy (Rys. 16). Znacznie krótsze zarejestrowane czasy ładowania akumulatora, które jesienią sezonu

2013 wynosiły 2,8÷5,3 godziny oznaczają mniejsze ilości ciepła gromadzone w złożu akumulatora. Pomimo to, badania przeprowadzone przez Konopackiego i in. (2012) w październiku 2011 roku wykazały, że nawet podczas pracy tylko jednej wąskiej sekcji akumulatora uzyskano wzrost temperatury powietrza w tunelu o 1,5°C. Porównanie zapotrzebowania na ciepło dla uprawy w tunelu foliowym oraz ilości ciepła możliwego do odzyskania z akumulatora o złożu kamiennym wskazuje, że akumulator może pokryć potrzeby energetyczne poczawszy od połowy maja (Konopacki i in., 2014c), gdy jako minimalną temperaturę utrzymywaną w nocy przyjmie się 18°C. Praktyka ogrodnicza wskazuje jednak, że wielu producentów ogranicza koszty ogrzewania upraw pod osłonami przyjmując 12÷13°C jako minimalną temperaturę w nocy (Bouadila i in., 2014a). Taka temperatura jest przyjmowana za graniczną dla prawidłowego pobierania składników pokarmowych, powstawania zawiązków owoców oraz porażenia korzeni roślin przez pleśń (Nowak i in., 2014b; Gourdo i in., 2019). Porównanie ilości ciepła możliwego do odzyskania z akumulatora oraz zapotrzebowania na ciepło przy zapewnieniu minimalnej temperatury 12°C wskazuje, że akumulator ciepła jest w stanie zaspokoić potrzeby energetyczne upraw pod osłonami już od połowy kwietnia, a przy sprzyjających warunkach środowiskowych od początku kwietnia (Konopacki i in., 2014c). Jednocześnie efektywne dogrzewanie roślin przy pomocy akumulatora ciepła można prowadzić do połowy października, chociaż występowanie pochmurnych dni i chłodnych nocy, jakie zaobserwowano np. w sezonie 2013 już od trzeciej dekady sierpnia, może skrócić okres efektywnego wykorzystywania akumulatora ciepła do trzeciej dekady września.

Pomimo, że bilans entalpii jest popularną metodą oceny efektywności gromadzenia i oddawania ciepła w akumulatorach ciepła (Kürklü i Bilgin, 2004; Utlu i in., 2014; Kappler i in., 2018; Diao i in., 2019), to zjawisko parowania i skraplania wody w akumulatorze nie było dotąd przedmiotem zainteresowania badaczy. Tylko Kurpaska i Latała (2010) podczas analizy energetycznej akumulatora ziemnego włączyli ciepło przemian fazowych wody w glebie do bilansu strat cieplnych. Kurpaska i in. (2014) zaobserwowali różnice w wilgotności bezwzględnej powietrza zatłaczanego do akumulatora ciepła o złożu kamiennym i z niego wypływającego. Przeprowadzone analizy wykazały, że bilans wilgotności zależy od wielkości strumienia zatłaczanego powietrza, strumienia ciepła w zatłaczanym powietrzu oraz początkowej temperatury złoża akumulatora. Do obliczeń bilansu masy wody użyli również, jako metody równoważnej, temperaturę i deficyt ciśnienia pary wodnej (VPD) w zatłaczanym powietrzu oraz wielkość strumienia powietrza. Jednak ciepło przemian fazowych nie było do tej pory uwzględniane w bilansie cieplnym ładowania lub rozładowywania akumulatora o złożu stałym, gdy medium cieplnym był strumień powietrza. Duża dysproporcja w masie wody ulegającej skraplaniu i parowaniu w poszczególnych cyklach ładowania, przedstawiona w niniejszym opracowaniu (Rys. 22) wskazuje, że część wody skroplona w złożu akumulatora spływała na jego dno i wydostawała się na zewnątrz złoża. W wyniku tego procesu tylko ta część wody, która pozostała w złożu mogła ulec odparowaniu w cyklach rozładowywania akumulatora. Potwierdza to znacznie mniejsza ilość wody wydostającej się z akumulatora zarejestrowana podczas cykli rozładowywania (Rys. 27). Uwzględnianie ciepła przemian fazowych wody w bilansie cieplnym pracy akumulatora jest uzasadnione, o czym świadczy większa ilość zmiennych, z którymi tak obliczane ciepło koreluje się w sposób istotny, w porównaniu do ciepła obliczanego wyłącznie jako bilans entalpii (Tab. 2, 4, 6, 8, 10 i 12). W tabelach 6 i 10 współczynnik korelacji temperatury zasysanego powietrza T_{zas} jest istotny w odniesieniu do skorygowanego ciepła ładowania Q_{LAD+FAZ}, a w stosunku do

ciepła ładowania Q_{LAD}, które nie uwzględnia ciepła przemian fazowych, ta zmienna nie koreluje się istotnie. Podobna zależność jest widoczna w przypadku temperatury powietrza wewnątrz tunelu Trośl i temperatury otoczenia Tzew w tabeli 2. Wśród analiz danych dotyczących cykli rozładowywania (Tab. 8), różnica temperatur wewnątrz tunelu i temperatur złoża $\Delta T_{rośl}$ złoża korelowała się istotnie ze skorygowanym ciepłem rozładowywania QROZŁAD+FAZ, a nieistotnie w stosunku do ciepła rozładowywania O_{ROZLAD}, które nie uwzgledniało ciepła przemian fazowych. Jedyny odwrotny przypadek wystąpił w analizie przedstawionej w tabeli 2, gdzie temperatura złoża korelowała się istotnie z ciepłem rozładowywania QROZŁAD, a nieistotnie ze skorygowanym ciepłem rozładowywania QROZŁAD+FAZ. Znacznie silniejszym argumentem uzasadniającym potrzebę uwzględniania ciepła przemian fazowych wody w bilansie cieplnym pracy akumulatora są wyższe współczynniki determinacji R² uzyskane podczas analiz regresji wielorakiej dla wartości skorygowanego ciepła ładowania lub rozładowania niż współczynniki determinacji uzyskane w analogiczny sposób dla wartości ciepła ładowania lub rozładowywania, bez uwzględniania ciepła przemian fazowych. W przypadku analizy wielorakiej przeprowadzonej dla skorygowanego ciepła ładowania Q_{ŁAD+FAZ}, której wyniki są zamieszczone w tabeli 3, uzyskano poprawiony współczynnik determinacji R²=83,3%, podczas gdy analogiczna regresja wieloraka wyznaczona dla nieskorygowanego ciepła ładowania Q_{LAD} cechowała się poprawionym współczynnikiem determinacji R²=29,4%. Podobne wyniki uzyskano dla kolejnych analiz wielorakich przeprowadzonych dla cykli ładowania. Poprawiony współczynnik determinacji R² uzyskany dla analizy skorygowanego ciepła ładowania Q_{LAD+FAZ}, przedstawionej w tabeli 7, wyniósł 89,5%, podczas gdy wynik analogicznej analizy dla Q_{LAD} wyniósł 68,9%. Kolejna analiza przeprowadzona dla Q_{LAD+FAZ} (Tab. 11) cechowała się współczynnikiem R²=88,8%, podczas gdy analogiczna analiza przeprowadzona dla Q_{LAD} cechowała się współczynnikiem R²=67,0%. Podobne zależności, chociaż nie za każdym razem, uzyskano w wyniku analiz przeprowadzonych dla cykli rozładowywania. W przypadku analizy wielorakiej przeprowadzonej dla skorygowanego ciepła rozładowywania Q_{ROZŁAD+FAZ}, której wyniki są zamieszczone w tabeli 5, uzyskano poprawiony współczynnik determinacji R²=78,1%, podczas gdy analogiczna regresja wieloraka opracowana dla nieskorygowanego ciepła rozładowywania Q_{ROZLAD} cechowała się poprawionym współczynnikiem determinacji R²=55,1%. Jednak w dwóch kolejnych analizach dysproporcje pomiędzy współczynnikami korelacji uzyskanymi dla skorygowanego i nieskorygowanego ciepła rozładowywania były znacznie mniejsze. Poprawiony współczynnik determinacji R² uzyskany dla analizy skorygowanego ciepła rozładowywania Q_{ROZLAD+FAZ}, przedstawionej w tabeli 9, wyniósł 84,3%, podczas gdy wynik analogicznej analizy dla QROZŁAD wyniósł 81,8%. Kolejna analiza przeprowadzona dla Q_{ROZŁAD+FAZ} (Tab. 13) cechowała się współczynnikiem $R^2=78,0\%$, podczas gdy analogiczna analiza przeprowadzona dla Q_{ROZLAD} cechowała się współczynnikiem R²=74,7%. Mniejsze dysproporcje w wartościach współczynników determinacji uzyskanych dla cykli rozładowywania można jednak tłumaczyć znacznie mniejszymi masami wody ulegającej parowaniu lub skraplaniu podczas cykli rozładowywania (Rys. 27) w porównaniu do masy wody ulegającej skraplaniu lub parowaniu podczas cykli ładowania (Rys. 22). Wysoki wpływ różnicy pomiędzy temperaturą powietrza zatłaczanego do złoża akumulatora a temperaturą samego złoża przed rozpoczęciem cyklu został stwierdzony w wyniku analizy regresji wielorakiej zarówno dla cykli ładowania (Tab. 3) jak i rozładowywania (Tab. 5). W przypadku ładowania powietrze zatłaczane do akumulatora

było zasysane z najwyższej części tunelu i w niniejszym opracowaniu jest oznaczone symbolem T_{zas} , stąd w analizie regresji jako różnica temperatur występuje zmienna $\Delta T_{zas-złoża}$. Natomiast w przypadku rozładowywania powietrze zatłaczane do akumulatora było zasysane spomiędzy roślin i w niniejszym opracowaniu jest oznaczone symbolem $T_{rośl}$, stąd w analizie regresji jako różnica temperatur występuje zmienna $\Delta T_{rośl-złoża}$. Decydujący wpływ tych zmiennych na, odpowiednio, ilość skorygowanego ciepła ładowania i rozładowywania jest generalnie zgodny z prawem Newtona. Model regresji wielorakiej zakłada liniowy wkład zmiennej niezależnej do predykcji zmiennej zależnej, a prawo Newtona stanowi, że ilość energii przekazanej w jednostce czasu jest proporcjonalna do różnicy temperatur. Równanie Newtona tłumaczy również istotny wpływ objętości kruszywa w złożu akumulatora na predykcję ciepła ładowania i rozładowywania (Tab. 7, 9, 11 i 13), bowiem objętość kruszywa jest w omawianym akumulatorze ciepła reprezentacją powierzchni wymiany ciepła występującą w równaniu Newtona. Podobnie wysoki wpływ strumienia zatłaczanego powietrza wykazany w analizach regresji, których wyniki przedstawiono w tabelach 7, 9, 11 i 13 jest konsekwencją liniowej zależności entalpii powietrza wtłaczanego do złoża akumulatora od masy suchego powietrza i pary wodnej we wtłaczanym powietrzu. Pomimo, że model regresji wielorakiej jest stosunkowo prosty, to uzyskane dla skorygowanych wartości ciepła ładowania lub rozładowywania wartości poprawionych współczynników determinacji R² należy uznać za zadowalające. Najniższa uzyskana wartość R² wyniosła 78,0% (Tab. 13), a najwyższa wyniosła 89,5% (Tab. 7). Uzyskane w badaniach upraw pod osłonami współczynniki determinacji dla analizy regresji wielorakiej mogą mieścić się w znacznie niższym zakresie 19,9÷73,7% (Maslak i Nimmermark, 2014). Z kolei użycie bardziej złożonych modeli do obliczeń cieplnych w uprawach pod osłonami nie jest jednoznaczne z uzyskaniem R² wyższego niż 89% (Yang i in. 2016). Badania Kurpaski i in. (2014) wskazują jednak, że wielkość ciepła ładowania może być powiązana z szeregiem zmiennych niezależnych zależnościami wykładniczymi. W przypadku strumienia zatłaczanego powietrza oznaczałoby to, że nadmierne zwiększanie strumienia powietrza byłoby niekorzystne z powodu zbyt małych zysków z tytułu przyrostu ilości gromadzonego ciepła w stosunku do przyrostu kosztów użytkowania i budowy instalacji, wynikających z potrzeby użycia wentylatora o dużej wydajności. Logiczne rozumowanie podpowiada również, że wielkość złoża akumulatora powinna uwzględniać także koszty budowy akumulatora o określonej wielkości złoża i potencjalne zyski cieplne wynikające z jego pracy. Schmidt i in. (2003) wykazali, że wraz ze zwiększaniem pojemności cieplnej akumulatorów różnego typu ich koszt jednostkowy zmniejsza się logarytmicznie. Jest to istotne zwłaszcza dla wykorzystywania akumulatora ciepła w okresach wiosennym i jesiennym, gdy niskie wielkości nasłonecznienia ograniczają ilość ciepła możliwą do zgromadzenia w akumulatorze i późniejszego wykorzystania. Wspomniana już powyżej analiza zmian zapotrzebowania na ciepło dla uprawy w tunelu foliowym w trakcie sezonu wegetacyjnego oraz ilości ciepła możliwego do odzyskania z akumulatora o złożu kamiennym (Konopacki i in., 2014c) wskazuje, że znaczne ograniczenie wielkości złoża zmniejszyłoby znacząco koszty inwestycji, lecz jednocześnie spowodowałoby zauważalne skrócenie okresu pracy akumulatora, w którym odzyskiwane ze złoża ciepło wystarczałoby na pokrycie zapotrzebowania energetycznego uprawianych roślin. Dla dokładnego wyznaczenia takiej zależności konieczne byłoby jednak kilkuletnie monitowanie pracy akumulatorów o różnej pojemności złoża w okresach wczesnowiosennych i późnojesiennych.

Efektywność pracy akumulatora ciepła jest często wyrażana bądź jako ilość ciepła możliwa do odzyskania z akumulatora (Öztürk i Başçetinçelik, 2003), badź jako różnica temperatur pomiędzy tunelem współpracującym z akumulatorem, a temperaturą otoczenia (Kürklü i in., 2003; Attar in., 2014; Xu i in., 2014; Gourdo i in., 2019). Część badaczy opisuje efektywność pracy akumulatora poprzez porównywanie temperatury powietrza wewnatrz obiektu uprawowego współpracującego z akumulatorem ciepła z temperaturą powietrza wewnątrz analogicznego obiektu, lecz pozbawionego akumulatora ciepła (Sams i in., 2011; Bouadila i in., 2014b; Gourdo i in., 2019). Przedstawione w niniejszej pracy zwiększenie nocnych temperatur powietrza w tunelach dogrzewanych, w porównaniu do tunelu kontrolnego, wyniosło od 2,2°C w czerwcu (Rys. 39) do 2,7°C w maju (Rys. 38). Podobny wynik uzyskali Bouadila i in. (2014b), którzy stwierdzili wzrost temperatury w dogrzewanej szklarni o 2÷5°C w porównaniu do szklarni niedogrzewanej oraz Gourdo i in. (2019), którzy zanotowali różnice temperatur do 3°C. Troche wyższy przyrost temperatury, wynoszacy 5÷7°C zanotowali Sams i in. (2011). Wyniki uzyskane w warunkach klimatycznych Polski, chociaż niższe, są jednak satysfakcjonujące, ponieważ już w kwietniu średnia nocna temperatura w tunelu dogrzewanym akumulatorem ciepła wyniosła 14,2°C, czyli przekroczyła minimalny poziom temperatury niezbędny do prawidłowego wzrostu roślin. Zmniejszenie dobowej amplitudy temperatur spowodowane pracą akumulatora ciepła można zaobserwować również w danych prezentowanych przez Kürklü i innych (2003) oraz Gourdo i innych (2019), chociaż badacze ci nie omawiali problemu amplitudy temperatur w swoich pracach. Zwrócili natomiast uwagę na spadek wilgotności względnej powietrza w nocy i wzrost w ciągu dnia w tunelu współpracującym z akumulatorem ciepła, w porównaniu do tunelu kontrolnego. Kürklü i in. (2003) ocenili różnice wilgotności względnej zarówno w dzień jak i w nocy na około 13%, co jest wynikiem zbliżonym do obserwacji Bouadila i innych (2014b), którzy nocny spadek wilgotności względnej ocenili na 10+20%. Mniejsze różnice zarejestrowali Gourdo i in. (2019), którzy w tunelach uzyskali spadek wilgotności o 5% w nocy oraz wzrost o 4% w dzień. Efektem zmiany trybu pracy akumulatora ciepła z dogrzewania roślin w nocy na schładzanie roślin w dzień było obniżenie temperatury powietrza w tunelu współpracującym z akumulatorem o 1,5-3,8°C, w zależności od intensywności radiacji słonecznej (Tab. 15). Znacznie większe różnice temperatur zarejestrowali Kürklü i Bilgin (2004) oraz Attar i in. (2014), którzy uzyskali po 12°C schłodzenia powietrza w obiektach z akumulatorami ciepła. Jednak Kürklü i Bilgin (2004) swoje doświadczenie prowadzili w obiekcie bez uprawy roślin, co oznacza brak dużej masy roślinnej, która stanowi ważny bufor dla jakichkolwiek zmian temperatury. Natomiast Attar i in. (2014) prowadzili doświadczenie w szklarni o powierzchni zaledwie 3,7 m². Tak więc uzyskane przez tych badaczy wyniki nie mogą być porównywane z wynikami prezentowanymi w niniejszym opracowaniu.

Porównanie efektów pracy różnych akumulatorów ciepła o złożu kamiennym przeprowadzone przez Sethi i Sharma (2008) wskazuje, że zależą one częściowo od warunków środowiskowych, w których były prowadzone badania, a częściowo od proporcji pojemności cieplnej akumulatora do wielkości obiektu szklarniowego, z którym dany akumulator współpracował. Tylko obiekty o wysokiej pojemność cieplnej umożliwiają stopniowe gromadzenie dobowych nadwyżek ciepła i wykorzystanie ich w okresie, gdy niskie nasłonecznienie nie pozwala na efektywne doładowania akumulatora w ciągu dnia, podczas gdy niska temperatura powietrza na zewnątrz tunelu, wymusza konieczność intensywnego dogrzewania roślin.

8. WNIOSKI

- 1. Wyniki prac eksperymentalnych potwierdziły, że akumulator o złożu kamiennym posadowiony pod tunelem foliowym, zasilany powietrzem z górnej części obiektu, pracujący w warunkach klimatycznych Polski Centralnej, może skutecznie gromadzić i oddawać energię zależnie od zewnętrznych warunków środowiskowych.
- Stwierdzono, że największy wpływ na ilość ciepła gromadzonego w akumulatorze, oraz z niego odzyskiwanego, mają różnica temperatur pomiędzy wtłaczanym powietrzem a złożem akumulatora, wielkość strumienia zatłaczanego powietrza oraz wielkość złoża akumulatora.
- 3. Wykazano, że ciepło przemian fazowych wody jest istotną częścią bilansu cieplnego akumulatora zarówno podczas jego ładowania, jak i rozładowywania. Wtłaczanie ciepłego wilgotnego powietrza do chłodnego złoża akumulatora powoduje skraplanie pary wodnej w złożu. Z kolei w czasie stopniowego nagrzewania się złoża podczas ładowania akumulatora zaobserwowano wzrost intensywności parowania wody znajdującej się w złożu.
- 4. Działanie akumulatora ciepła współpracującego z tunelem foliowym powoduje nie tylko podwyższenie temperatury powietrza wewnątrz tunelu podczas jego dogrzewania w nocy lub w chłodne dni, lecz często powoduje również obniżenie temperatury powietrza w tunelu podczas ładowania akumulatora w dzień.
- 5. Zmiana trybu pracy akumulatora ciepła z dogrzewania roślin w nocy lub w chłodne dni, na schładzanie roślin w ciągu letnich gorących dni pozwala znacząco obniżyć temperaturę powietrza kierowanego z akumulatora do wnętrza tunelu. Zastosowanie tego trybu w okresie letnim pozwala nadal efektywnie dogrzewać rośliny nocą.
- 6. W odniesieniu do tunelu foliowego dogrzewanego przez akumulator ciepła zaobserwowano tendencję skracania sumarycznych czasów, gdy deficyt ciśnienia pary wodnej (VPD) jest bardzo niski i gdy jest bardzo wysoki.
- 7. Pomimo potwierdzenia możliwości skutecznego gromadzenia i oddawania ciepła, zebrane dane eksperymentalne nie są wystarczające dla jednoznacznego określenia wielkości złoża akumulatora oraz strumienia zatłaczanego powietrza, które stanowiłyby równowagę pomiędzy zyskami cieplnymi, a nakładami energetycznymi.

PODZIĘKOWANIA

Wyniki doświadczalne wykorzystane w niniejszej pracy zostały zebrane podczas realizacji projektu pt. "Opracowanie innowacyjnych technologii magazynowania energii w produkcyjnych tunelach foliowych" (akronim HortiEnergia, umowa nr UDA-POIG.01.03.01-10-115/09), współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

BIBLIOGRAFIA

- Alkilani, M. M., Sopian, K., Alghoul, M. A., Sohif, M., Ruslan, M. H. (2011). Review of solar air collectors with thermal storage units. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1476-1490.
- Al-Mahdouri, A., Gonome, H., Okajima, J., Maruyama, S. (2014). Theoretical and experimental study of solar thermal performance of different greenhouse cladding materials. *Solar Energy*, 107, 314-327.
- Analizy Rynkowe (2016). Rynek Owoców i Warzyw stan i perspektywy. Instytut Ekonomiki Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej PIB, nr 48, czerwiec 2016 r. Pozyskano z https://www.ierigz.waw.pl/download/19852-owoce 48 16-net.pdf (dostęp 2016-03-17)
- Attar, I., Naili, N., Khalifa, N., Hazami, M., Lazaar, M., Farhat, A. (2014). Experimental study of an air conditioning system to control a greenhouse microclimate. *Energy Conversion and Management*, 79, 543-553.
- Bezari, S., Bekkouche, A., Bensaha, H., Benchatti, A. (2015). Amelioration of a greenhouse through energy storage system Case study: Ghardaia region (Algeria). *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 22-25 Nov. 2015, Palermo, Italy, art no. 7418479, s. 578-582.
- Bouadila, S., Kooli, S., Skouri, S., Lazaar, M., Farhat, A. (2014a). Improvement of the greenhouse climate using a solar air heater with latent storage energy. *Energy*, 64, 663-672.
- Bouadila, S., Lazaar, M., Skouri, S., Kooli, S., Farhat, A. (2014b). Assessment of the greenhouse climate with a new packed-bed solar air heater at night, in Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 31-41
- Bouhdgar, A., Boulbing, A. (1990). Rockbed as a heat storage material for greenhouse heating. W: A. Sayigh Reading (red.), *Proceedings of Congress Energy and the Environment*. London, UK, 2325-2327.
- Bouhdjar, A., Belhamel, M., Belkhiri, F. E., Boulbina, A. (1996). Performance of sensible heat storage in a rockbed used in a tunnel greenhouse. *Renewable Energy*, 9(1-4),724-728
- Boulard, T., Razafinjohany, E., Baille, A., Jaffrin, A., Fabre, B. (1990). Performance of a greenhouse heating system with a phase change material. *Agricultural and Forest Meteorology*, 52(3-4), 303-319.
- BP. (2018). Statistical Review of World Energy, 67th edition. Pozyskano z https://www.bp.com/content/ dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf (dostęp 2019-01-20).
- Bredenbeck, H. (1984). Rock bed storage inside of greenhouses. Acta Horticulture, 148, 739-744.
- Cabeza, L. F., Martorel, I., Miró, L., Fernández, A. I., Barreneche, C. (2015). Introduction to thermal energy storage (TES) systems. W: L. F. Cabeza (red.), Advances in Thermal Energy Storage Systems. Elsevier, Woodhead Publishing Series in Energy, 66, 1-28.
- Chandra, P., Willits, D. H. (1981). Pressure drop and heat transfer characteristics of air-rockbed thermal storage systems. *Solar Energy*, 27(6), 547-553.
- Chel, A., Kaushik, G. (2011). Renewable energy for sustainable agriculture. Agronomy for Sustainable Development, 31(1), 91-118.
- Choudhury, C., Chauhan, P. M., Garg, H. P. (1995). Economic design of a rock bed storage device for storing solar thermal energy. *Solar Energy*, 55(1), 29-37.
- Coomans, M., Allaerts, K., Wittemans, L., Pinxteren, D. (2013). Monitoring and energetic performance of two similar semi-closed greenhouse ventilation systems, *Energy Conversion and Management*, 76, 128-136.

- Cuce, E., Harjunowibowo, D., Cuce, P. M. (2016). Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Re*views, 64, 34-59.
- Dagdougui, H., Ouammi, A., Robba, M., Sacile, R. (2011). Thermal analysis and performance optimization of a solar water heater flat plate collector: Application to Tétouan (Morocco). *Renewable* and Sustainable Energy Review, 15(1), 630–638.
- Dell Inc. (2016). Dell Statistica (data analysis software system), version 13. www.statsoft.com.
- Diao, Y. H., Liang, L., Zhao, Y. H., Wang, Z. Y., Bai, F. W. (2019). Numerical investigation of the thermal performance enhancement of latent heat thermal energy storage using longitudinal rectangular fins and flat micro-heat pipe arrays. *Applied Energy*, 233–234, 894-905
- Dickens, J., Potter, R. (1983). Spraying for white rust. Grower, 100(18), 35-37.
- **Dobrzańska, J. (1987).** *Szklarniowa uprawa warzyw*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwa Rolnicze i Leśne, ss. 240
- Doniec, A. (1981) (red.). Zbiór danych do obliczeń z inżynierii chemicznej. Politechnika Łódzka
- Dutil, Y., Rousse, D., Lassue, S., Zalewski, L., Joulin, A., Virgone, J., Kuznik, F., Johannes, K., Dumas, J.-P., Bédécarrats, J.-P., Castell, A., Cabeza, L.F. (2014). Modeling phase change materials behavior in building applications: Comments on material characterization and model validation. *Renewable Energy*, 61, 132-135.
- Ermuratskii, V., Oleschuk, V., Blaabjerg, F. (2015). Experimental investigation of two modified energy-saving constructions of solar greenhouses. *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, art. no. 7418151, s. 339-342.
- Fath, H. E. S. (1991). Heat exchanger performance for latent heat thermal energy storage system. Energy Conversion and Management, 31(2), 149-155.
- Gao, L. H., Qu, M., Ren, H-Z., Qing-Yun Chen, X-L., Zhang, Z-X. (2010). Structure, Function, Application, and Ecological Benefit of a Single-slope, Energy-efficient Solar Greenhouse in China. *HortTechnology*, 20, 626–631.
- García, J. L., De la Plaza, S., Navas, L. M., Benavente, R. M., Luna, L. (1998). Evaluation of the Feasibility of Alternative Energy Sources for Greenhouse Heating. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 69, 107-114.
- Gourdo, L., Fatnassi, H., Tiskatine, R., Wifaya, A., Demrati, H., Aharoune, A., Bouirden, L. (2019). Solar energy storing rock-bed to heat an agricultural greenhouse. *Energy*, 169, 206-212
- Gupta, A., Tiwari, G. N. (2002). Computer model and its validation for prediction of storage effect of water mass in a greenhouse: A transient analysis. *Energy Conversion and Management*, 43(18), 2625-2640.
- GUS. (2018). Energia ze źródeł odnawialnych w 2017 r. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa. Pozyskano z https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5485/3/12/1 /energia_ze_zrodel_odnawialnych_2017.pdf (dostęp 2019-03-20)
- Gutkowski, A., Kapusta T. (2014) (red.). Zbiór zadań z termodynamiki technicznej. Politechnika Łódzka
- Hamada, Y., Fukai, J. (2005). Latent heat thermal energy storage tanks for space heating of buildings: Comparison between calculations and experiments. *Energy Conversion and Management*, 46(20), 3221-3235.
- Hassanien, R. H. E., Li, M., Dong Lin, W. (2016). Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 989-1001.
- Hołownicki, R., Konopacki, P., Kurpaska, S., Latała, H., Treder, W., Nowak, J. (2012). Magazynowanie nadwyżek ciepła w tunelach foliowych – koncepcja kamiennego akumulatora ciepła. *In*żynieria Rolnicza, 2(136), 79-87.
- Hołownicki, R., Konopacki, P., Kurpaska, S., Latała, H., Broniarek, R., Rutkowski, K., Treder, W., Nowak, J. (2015). Sposób wykorzystania naturalnej energii cieplnej w akumulatorze ciepła oraz akumulator ciepła. *Patent RP* nr 220435.

- Huang, B. K., Ozisik, M. N., Toksoy, M. (1981). Development of greenhouse solar drying for farm crops and processed products. AMA (Japan), 12(1), 47-52.
- Jaffrin, A., Cadier, P. (1982). Latent heat storage applied to horticulture. Solar Energy, 28(4), 313-321.
- Kaniszewski, S. (2007). Produkcja warzyw w Polsce. Stan obecny i perspektywy. *Haslo Ogrodnicze*, 4, 153-156.
- Kappler, G., Dias, J. B., Haeberle, F., Wander, P. R., Moraes, C. A. M., Modolo, R. C. E. (2019). Study of an earth-to-water heat exchange system which relies on underground water tanks. *Renewable Energy*, 133, 1236-1246.
- Klamkowski, K., Treder, W., Treder, J., Puternicki, A., Lisak, E. (2012). Wpływ doświetlania lampami sodowymi i LED na aktywność fotosyntetyczną oraz wzrost roślin pomidora. Prace Instytutu Elektrotechniki, 256, 75-86.
- Konopacki, P., Holownicki, R., Kurpaska, S., Latala, H., Broniarek, R., Nowak, J. (2014a). Urządzenie do zasłaniania. *Patent RP* nr 228864
- Konopacki, P., Holownicki, R., Kurpaska, S., Latala, H., Sabat, R., Treder, W., Nowak, J. (2014b). Application of multisectional rock bed heat accumulator in high tunnel horticultural crop production and potential effects of its use. *International Conference of Agricultural Engineering Conference, AgEng 2014*, 6-10.07.2014 Zurich, Paper No. C0555.
- Konopacki, P., Holownicki, R., Nowak, J., Treder, W., Kurpaska, S., Latała, H. (2014c). Efekty energetyczne akumulatora ciepła. W: Praca zbiorowa, *Magazynowanie ciepła w produkcyjnych tunelach foliowych*. Instytut Ogrodnictwa, Skierniewice. ISBN 978-83-89800-62-6.
- Konopacki, P., Holownicki, R., Sabat, R., Kurpaska, S., Latala, H. (2012). Magazynowanie ciepła w akumulatorze kamiennym. *Inżynieria Rolnicza*, 2(137), 113-122.
- Konopacki, P., Holownicki, R., Sabat, R., Kurpaska, S., Latala, H., Nowak, J. (2015). The Use of Rock-Bed for Storage of Solar Energy Surplus in High Plastic Tunnels - Preliminary Results of the Full Scale Project. II International Symposium on Horticulture in Europe. Acta Horticulturae, 1099, 107-114.
- Konopacki, P., Sabat, R., Holownicki, R., Kurpaska, S., Latała, H. (2013). Zmienność prędkości przepływu powietrza w akumulatorze ciepła o złożu kamiennym w zależności od konstrukcji układu rozprowadzania powietrza. *Inżynieria Rolnicza*, 4(147), 129-138.
- Konopacki, P. J., Treder, W., Klamkowski, K. (2018). Comparison of vapour pressure deficit patterns during cucumber cultivation in a traditional high PE tunnel greenhouse and a tunnel greenhouse equipped with a heat accumulator. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 16(1), e0201. doi:10.5424/sjar/20181614-11484
- Körner, O., Challa, H. (2003). Process-based humidity control regime for greenhouse crops. Computers and Electronics in Agriculture, 39, 173-192.
- Kürklü, A. (1998). Energy storage applications in greenhouses by means of phase change materials (PCMs): A review. *Renewable Energy*, 13(1), 89-103.
- Kürklü, A., Bilgin, S., Özkan, B. (2003). A study on the solar energy storing rock-bed to heat a polyethylene tunnel type greenhouse. *Renewable Energy*, 28(5), 683-697
- Kürklü, A., Bilgin, S. (2004). Cooling of a polyethylene tunnel type greenhouse by means of a rock bed. *Renewable Energy*, 29(13): 2077-2086.
- Kurpaska, S. (2007). Szklarnie i tunele foliowe. Inżynieria i procesy. PWRiL, Poznań, ss. 288
- Kurpaska, S., Latała, H. (2010). Energy analysis of heat surplus storage systems in plastic tunnels. *Renewable Energy*, 35(12), 2656-2665.
- Kurpaska, S., Latała, H., Holownicki, R., Konopacki, P., Nowak, J. (2013). Analiza zagadnień cieplnych w tunelu foliowym podczas dostarczania ciepła z akumulatora kamiennego. *Inżynieria Rolnicza*, 3(145), 179-189.
- Kurpaska, S., Latala, H., Konopacki, P., Holownicki, R. (2014). Analysis of the selected factors impact on the amount of the stored heat and the mass change in the rock-bed storage placed in the laboratory tunnel. *Agricultural Engineering*, 3(151), 71-83.

- Kurpaska, S., Latała, H., Rutkowski, K., Hołownicki, R., Konopacki, P., Nowak, J., Treder, W. (2012). Magazynowanie nadwyżki ciepła z tunelu foliowego w akumulatorze ciała stałego. *Inżynieria Rolnicza*, 2(137) t. 1, 157-167.
- Lau, P. (2007). Forsmark site investigation. Drill holes KFM01A, KFM07A, and KFM08A. Specific heat capacity of rocks using calorimetric measurements. SKB P-07-19, Svensk Kärnbränslehantering AB, ISSN 1651-4416.
- Levit, H. J., Gaspar, R., Piacentini, R. D. (1989). Simulation of greenhouse microclimate by earthtube-heat-exchangers. Agriculture and Forest Meteorology, 47, 31–47.
- Lu, W., Zhang, Y., Fang, H., Ke, X., Yang, Q. (2017). Modelling and experimental verification of the thermal performance of an active solar heat storage-release system in a Chinese solar greenhouse. *Biosystems Engineering*, 160, 12-24.
- Machida, Y., Kudoh, Y., Takeda, T. (1985). Use of phase change materials for greenhouse heating. Proceedings of Symposium on Thermal Applications of Solar Energy, Kobe, Japan, ISES, 503-508.
- Maslak, K., Nimmermark, S. (2014). Thermal energy use in three Swedish greenhouses the outdoor temperature-dependent variation and the influence of wind speed under no-sunlight conditions. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, 16(3), 43-54.
- Massalski, J., Massalska, M. (1973). Fizyka dla inżynierów. Część I. Fizyka klasyczna. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, ss. 620.
- Ministerstwo Środowiska. (2001). Strategia Rozwoju Energetyki Odnawialnej. Warszawa, 23 sierpnia 2001. Pozyskano z https://nape.pl/upload/file/akty-prawne/strategie-rozwoju/strategia_rozwoju_enodnawialnej.pdf (dostęp 2019-01-26)
- Mogharreb, M. M., Abbaspour-Fard, M. H., Goldani, M., Emadi, B. (2014). The effect of greenhouse vegetation coverage and area on the performance of an earth-to-air heat exchanger for heating and cooling modes. *International Journal of Sustainable Engineering*, 7(3), 245-252.
- Mueller, W., Maćkowiak, S., Siatkowsk, i I. (2010). System informatyczny do symulacji przepływu ciepła w kamiennym akumulatorze. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 55(2), 51-55.
- Nash, R., Williamson J. (1978). Greenhouse heating using solar energy. W: E. Bilgen, K. G. T. Hollands (red.), Proceedings of ISES Solar World Congress. Hamburg, 64-69.
- Nowak, J. S., Holownicki, R., Konopacki, P. (2014a). Wpływ podgrzewania podłoża ciepłem z akumulatora kamiennego na wzrost i plonowanie ogórka (odm. 'Melen' F1) w uprawie wiosennej w nieogrzewanych tunelach foliowych. Ogólnopolska Konferencja Naukowa "Współczesne trendy w uprawie i żywieniu roślin ogrodniczych". Lublin – Susiec, 12-13 czerwca 2014: 26
- Nowak, J. S., Holownicki, R., Konopacki, P. (2015). Wpływ zastosowania akumulatorów ciepła na wzrost, plonowanie i jakość ogórka (odm. 'Melen' F1) uprawianego w nieogrzewanych tunelach foliowych. IV Zjazd Polskiego Towarzystwa Nauk Ogrodniczych, *Konferencja naukowa "Postęp w ogrodnictwie dla poprawy jakości życia i ochrony środowiska. Streszczenia prac"*. Wrocław, 14-16.09.2015: 113
- Nowak, J., Wysocka-Owczarek, M., Kowalczyk, W. (2014b). Uprawa pomidora i ogórka w nieogrzewanych tunelach foliowych z zastosowaniem akumulatora kamiennego. W: Praca zbiorowa, *Magazynowanie ciepła w produkcyjnych tunelach foliowych*. Instytut Ogrodnictwa, Skierniewice. ISBN 978-83-89800-62-6.
- Ntinas, G. K., Fragos, V. P., Nikita-Martzopoulou, C. (2014). Thermal analysis of a hybrid solar energy saving system inside a greenhouse. *Energy Conversion and Management*, 81, 428-439.
- Ntinas, G. K., Kougias, P. G., Nikita-Martzopoulou, Ch. (2011). Experimental performance of a hybrid solar energy saving system in greenhouses. *International Agrophysics*, 25, 257-264.
- Öztürk, H. H., Başçetinçelik, A. (2003). Energy and Exergy Efficiency of a Packed-bed Heat Storage Unit for Greenhouse Heating. *Biosystems Engineering*, 86(2), 231-245
- Paksoy, H. Ö., Beyhan, B. (2014). Thermal energy storage (TES) systems for greenhouse technology.
 W: L. F. Cabeza (red.), *Advances in Thermal Energy Storage Systems*. Elsevier, Woodhead Publishing Series in Energy, 66, 433-548.

- Picken, A. J. F. (1984). A review of pollination and fruit set in the tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of Horticultural Science*, 59, 1-13.
- Pinel, P., Cruickshank, C. A., Beausoleil-Morrison, I., Wills, A. (2011). A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3341–3359.
- PN-EN ISO 13788:2003. Cieplno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku -- Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacji międzywarstwowej - Metody obliczania.
- Prenger, J., Ling, P. (2009). Greenhouse condensation control. Fact Sheet (Series) AEX-8004. Ohio State University Extension. 1-7
- Priarone, A., Fossa, M., Paietta, E., Rolando, D. (2017). Energy demand hourly simulations and energy saving strategies in greenhouses for the Mediterranean climate. *Journal of Physics: Conference Series*, 796(1), art. no. 012027.
- Pudlik, W. (2011). Termodynamika. Wyd. III. Politechnika Gdańska
- Redpath, D. A. G. (2012). Thermo syphon heat-pipe evacuated tube solar water heaters for northern maritime climates. *Solar Energy*, 86(2), 705–715.
- Rumpel, J., Grudzień, K. (1987). Folia w warzywnictwie gruntowym. Warszawa: Państwowe Wydawnictwa Rolnicze i Leśne, ss. 132
- Sabat, R., Konopacki, P., Holownicki, R., Kurpaska, S., Latała, H. (2013). Zastosowanie termowizji do badań rozkładu temperatury w tunelach foliowych wyposażonych w akumulatory ciepła. *In*żynieria Rolnicza, 3(145), 345-354.
- Sagara, K., Nakahara, N. (1991). Thermal performance and pressure drop of rock beds with large storage materials. *Solar Energy*, 47(3), 157-163.
- Sallanbas, H., Durceylan, H., Yelboga, K. (1987). W: C. Von Zabeltitz (red.), Greenhouse heating with solar energy, FAO
- Sams, C. E., Hayden, T., Amundson, S. (2011). Subterranean rock-bed for greenhouse heating and cooling. Acta Horticulture, 893, 485-492.
- Santamouris, M., Argiriou, A., Vallindras, M. (1994a). Design and operation of a low energy consumption passive solar agricultural greenhouse. *Solar Energy*, 52(5), 371–378.
- Santamouris, M., Balaras, C. A., Dascalaki, E., Vallindras, M. (1994b). Passive solar agricultural greenhouses: A worldwide classification and evaluation of technologies and systems used for heating purposes. *Solar Energy*, 53(6), 411-426.
- Schmidt, T., Mangold, D., Müller-Steinhagen, H. (2003). Seasonal thermal energy storage in Germany. ISES Solar World Congress, 14-19 June, Göteborg, Sweden
- Sethi, V. P. (2009). On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation. *Solar Energy*, 83(1), 21-38.
- Sethi, V. P., Sharma, S. K. (2008). Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy*, 82(9), 832-859.
- Sethi, V. P., Sumathy, K., Chiwon Lee, Pal, D. S. (2013). Thermal modelling aspects of solar greenhouse microclimate control: A review on heating technologies. *Solar Energy*, 96, 56-82.
- Sinclair, T., Fiscus, E., Wherley, B., Durham, M., Rufty T. (2007). Atmosferic vapor pressure deficit is critical in predicting growth response of "cool–season" grass *Festuca arundinacea* to temperature change. *Planta*, 227, 273-276.
- Singh, R., Saini, R. P., Saini, J. S. (2006). Nusselt number and friction factor correlations for packed bed solar energy storage system having large sized elements of different shapes. *Solar Energy*, 80(7), 760-771.
- Sobolewski, J., Robak, J., Gidelska, A. (2010). Możliwości wykorzystania środków konwencjonalnych i naturalnych w ochronie pomidora pod osłonami przed mączniakiem prawdziwym. *Progress in Plant Protection/Postępy w Ochronie Roślin*, 50(2), 737-740.
- Sobolewski, J., Robak, J., Ostrowska, A. (2006). Potencjalne możliwości środków organicznych w ograniczaniu *Phytophthora infestans* na pomidorach w uprawie polowej i pod osłonami. *Pro*gress in Plant Protection/Postępy w Ochronie Roślin, 46(2), 704–707.
- Tang, R., Yang, Y., Gao, W. (2011). Comparative studies on thermal performance of water-in-glasse vacuated tube solar water heaters with different collector tilt-angles. *Solar Energy*, 85(7), 1381–1389.
- Toruński, J. (2010). Możliwości wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce. Zeszyty Naukowe Akademii Podlaskiej w Siedlcach, Administracja i Zarządzanie, 86, 9-25.
- Treder, J. (2016). Zastosowanie lamp LED do doświetlania rozsady warzyw. Targi Sadownictwa i Warzywnictwa. Oficyna Wydawnicza Oikos. Pozyskano z http://www.inhort.pl/files/program_wieloletni/PW_2015_2020_IO/spr_2016/3.1_2016_TSW_JTreder.pdf (dostęp 2019-01-23)
- Ustawa Prawo energetyczne z dnia 10 kwietnia 1997 r. Dz. U. 1997 Nr 54 poz. 348 z poprawkami.
- Utlu, Z., Aydın, D., Kıncay, O. (2014). Comprehensive thermodynamic analysis of a renewable energy sourced hybrid heating system combined with latent heat storage, *Energy Conversion and Management*, 84, 311-325.
- Van den Bulck, N., Coomans, M., Wittemans, L., Goen, K., Hanssens, J., Steppe, K., Marien, H., Desmedt, J. (2012). Energetic evaluation of a smart controlled greenhouse for tomato cultivation. Proceedings of the 25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization and Simulation of Energy Conversion Systems and Processes, ECOS 2012, 7, 134-145.
- Walton, L. R., Wiley, W. H., Mcneill S., Bunn M. J. (1979). Storing Solar Energy in an Underground Rock Bed. *Transaction of the ASAE*, 22 (5), 1202-1207.
- Wize, A. (2018). Koncentracja produkcji i specjalizacja. Podoslonami.pl, Publikacja 18 lutego 2018 http://www.podoslonami.pl/koncentracja-produkcji-specjalizacja/ (dostęp 2018-08-02)
- Xu, J., Li, Y., Wang, R. Z., Liu, W. (2014). Performance investigation of a solar heating system with underground seasonal energy storage for greenhouse application. *Energy*, 67, 63-73.
- Xu, Z., Chen, J., Yu, G., Wang, Y. (2017). A switching control strategy of greenhouse cooling system based on temperature prediction model for energy saving. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 51(1), 77-84.
- Yang, S. H., Son, J. E., Lee, S. D., Cho, S. I., Ashtiani-Araghi, A., Rhee, J. Y. (2016). Surplus thermal energy model of greenhouses and coefficient analysis for effective utilization. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 14(1), e0202. doi:10.5424/sjar/2016141-7517
- Zhang, L., Xu, P., Mao, J., Tang, X., Li, Z., Shi, J. (2015). A low cost seasonal solar soil heat storage system for greenhouse heating: Design and pilot study. *Applied Energy*, 156, 213-222.

STRESZCZENIE

Koszt energii niezbędnej do ogrzania obiektu szklarniowego jest zasadniczym źródłem kosztów w produkcji pod osłonami, dlatego też redukcja nakładów energetycznych jest kluczowym elementem jej opłacalności. Jednym ze sposobów zmniejszania kosztów ogrzewania jest wykorzystanie odnawialnych źródeł energii (OZE), w tym przede wszystkim energii słonecznej. Efektywne wykorzystanie energii słonecznej wymaga jej magazynowania, np. w akumulatorach ciepła, w okresach wysokiego natężenia promieniowania i późniejsze wykorzystywanie w okresach chłodu. Celem pracy jest określenie przydatności akumulatora ciepła o złożu kamiennym, do uprawy roślin pod osłonami w warunkach krajowych. W opracowaniu opisano konstrukcję akumulatora ciepła o złożu kamiennym, umieszczonego pod typowym podwójnie krytym tunelem foliowym o wymiarach 9x30 m, podzielonym na dwie równe części. Układ sterowania pracą akumulatora umożliwiał jego działanie w trybie dogrzewania roślin uprawianych w tunelu w nocy i chłodne dni, oraz schładzania roślin w tunelu w gorące letnie dni. Przedstawiono obieg powietrza w różnych wariantach pracy akumulatora oraz algorytmy jego sterowania. Wykonano analizy wpływu szeregu zmiennych niezależnych, jak parametry fizyczne klimatu na zewnątrz tunelu ogrodniczego i w jego wnętrzu, oraz zmiennych zależnych od obserwatora, jak objetość złoża akumulatora i strumień powietrza zatłaczany do złoża. Wyniki prac eksperymentalnych potwierdziły, że akumulator o złożu kamiennym posadowiony pod tunelem foliowym, zasilany powietrzem z górnej części obiektu, pracujący w warunkach klimatycznych Polski Centralnej, może skutecznie gromadzić i oddawać energię zależnie od zewnętrznych warunków środowiskowych. Stwierdzono, że największy wpływ na ilość ciepła gromadzonego w akumulatorze, oraz z niego odzyskiwanego, mają różnica temperatur pomiędzy wtłaczanym powietrzem a złożem akumulatora, wielkość strumienia zatłaczanego powietrza oraz wielkość złoża akumulatora. Przedstawiono równania regresji wielorakiej opisujące wielkościowy wpływ istotnych zmiennych na ilość ciepła magazynowanego i odzyskiwanego z akumulatora. Przeprowadzone analizy wykazały również, że ciepło przemian fazowych wody jest istotną częścią bilansu cieplnego akumulatora. Uwzględnianie ciepła przemian fazowych jest szczególnie istotne podczas obliczeń dotyczących ładowania akumulatora, ponieważ współczynnik determinacji R² dla regresji wielorakiej opartej na bilansie entalpii uwzględniającym ciepło przemian fazowych wyniósł 88,8%, podczas gdy dla regresji wielorakiej opartej na bilansie entalpii bez uwzględniania ciepła przemian fazowych wyniósł 67,0%. W porównaniu do tunelu kontrolnego, w tunelu foliowym wyposażonym w akumulator ciepła temperatura powietrza była w nocy średnio wyższa o 2,4°C w kwietniu, 2,7°C w maju i 2,2°C w czerwcu, Największa zaobserwowana różnica temperatur w okresie wiosennym wyniosła 9,9°C, co mogłoby wskazywać na potencjał akumulatora ciepła w zakresie ochrony uprawianych roślin przed przymrozkami. Działanie akumulatora ciepła współpracującego z tunelem foliowym może powodować również obniżenie temperatury powietrza w tunelu podczas ładowania akumulatora w dzień. Zmiana trybu pracy akumulatora z dogrzewania roślin w nocy na ich schładzanie w dzień umożliwiła obniżenie temperatury powietrza wypływającego z akumulatora o 1,5÷3,8°C, w zależności od intensywności nasłonecznienia. Zastosowanie akumulatora ciepła miało również wpływ na deficyt ciśnienia pary wodnej (VPD) w powietrzu wewnątrz tunelu foliowego. W porównaniu z tunelem kontrolnym, sumaryczne okresy czasu, gdy deficyt był zbyt niski (poniżej 200 Pa) lub zbyt wysoki (powyżej 1400 Pa) były krótsze we wszystkich kolejnych miesiącach w sezonie 2013 roku dla tunelu wyposażonego w akumulator ciepła. Podczas uprawy ogórka i pomidora, w tunelu wyposażonym w akumulator ciepła, zaobserwowano lepsze ukorzenianie roślin oraz przyspieszenie plonowania, niż w tunelu kontrolnym. Podczas uprawy ogórka zaobserwowano również mniejsze występowanie chorób grzybowych wśród roślin dogrzewanych akumulatorem ciepła, co pozwoliło na zmniejszenie liczby chemicznych zabiegów ochrony roślin.

Słowa kluczowe: akumulator ciepła, złoże kamienne, tunel foliowy, mikroklimat

A HEAT STORAGE SYSTEM USING A ROCK-BED ACCUMULATOR - THE ENERGY ANALYSIS AND THE IMPACT ON THE MICROCLIMATE IN A PLASTIC TUNNEL

SUMMARY

The main source of costs in protected cultivation is the cost of the energy necessary to heat the facility. Therefore, the reduction of energy costs in greenhouse crop production is a vitally important issue. One of the methods to reduce heating costs is the use of renewable energy sources, primarily solar energy. The efficient use of solar energy requires storage in heat accumulators during periods of intense radiation and subsequent use in cool periods. The purpose of this study is to determine the suitability of a rock-bed heat accumulator for protected cultivation in Polish climate conditions. The construction of the rock-bed heat accumulator, used in the research, was described. The accumulator was placed under a typical double-covered high plastic tunnel measuring 9x30 m, divided by a plastic wall in two sections. The accumulator control system made it possible to heat plants at night and on cold days, or cool plants on hot summer days. The study presents the air circulation in a number of accumulator operation variants and algorithms for its control. Analyses of the influence of a number of independent variables, such as physical parameters of the climate outside the plastic tunnel and inside it, as well as variables dependent on the observer, such as the volume of the rock-bed and the air stream injected into the bed, were performed. The results confirmed that the rock-bed accumulator placed under a plastic tunnel, fed with air from the upper part of the facility, whilst working in the climatic conditions of Central Poland, can effectively store and recover energy, depending on external environmental conditions. Several factors were found to influence the amount of heat stored in the accumulator, and further recovered, the greatest of which were the difference in temperature between the injected air and the rock-bed, the volume of the stream of injected air and the size of the rock-bed. Multiple regression equations describing the quantitative effect of relevant variables on the amount of heat stored, and recovered, from the accumulator are presented. The analyses also indicate that the water phase transitions play an important role in the accumulator thermal balance. The heat of phase transitions is particularly important during accumulator charging calculations. The coefficient of determination R² for multiple regression based on the enthalpy balance and taking into account the heat of phase transitions was 88.8%, while for multiple regression based on the enthalpy balance without taking into account the heat of phase transitions was 67.0%. It was observed that in a plastic tunnel equipped with a heat accumulator, the air temperature was on average 2.4°C higher in April, 2.7°C in May and 2.2°C in June, compared to the control tunnel. The largest observed temperature difference during spring was 9.9°C, which may indicate the potential of the heat accumulator to protect cultivated plants against frost. Use of the heat accumulator often caused a reduction in the air temperature in the tunnel whilst charging the accumulator during the day. Changing the accumulator operation mode from heating plants at night to cooling them down during the day allowed a reduction in the temperature of the air flowing out of the accumulator by 1.5÷3.8°C, depending on the intensity of sunshine. The use of the heat accumulator

also affected the vapour pressure deficit (VPD) of the air inside the plastic tunnel. The total periods when the deficit was too low (below 200 Pa) or too high (above 1400 Pa) were shorter in all subsequent months during the 2013 season for the tunnel equipped with the heat accumulator compared to the control tunnel. During cultivation of cucumber and tomato, in the tunnel equipped with the heat accumulator, better rooting of plants and earlier yields were observed, when compared to the control tunnel. During cucumber cultivation, a lower occurrence of fungal diseases was observed among plants heated with the accumulator, which allowed a reduction in the number of chemical plant protection treatments.

Key words: heat accumulator, rock-bed, plastic tunnel, microclimate

